



**ITS**

Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

**TUGAS AKHIR - TE 141599**

**DESAIN DAN SIMULASI KONVERTER AC-DC-DC *ISOLATED*  
UNTUK PENEREMAN REGENERATIF MOTOR INDUKSI  
3 FASA PADA MOBIL LISTRIK**

**Muhammad Rizky Akbar  
NRP 2210 100 097**

**Dosen Pembimbing**

- 1. Dedet Candra Riawan, S.T., M.Eng., Ph.D.**
- 2. Ir. Arif Musthofa, M.T.**

**JURUSAN TEKNIK ELEKTRO  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2015**



**ITS**

Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

**FINAL PROJECT-TE 141599**

**DESIGN AND SIMULATION AC-DC-DC ISOLATED CONVERTER  
FOR REGENERATIVE BRAKING 3-PHASE INDUCTION MOTOR  
OF ELECTRIC VEHICLE**

**Muhammad Rizky Akbar**  
**NRP 2210 100 097**

**Advisor**

- 1. Dedet Candra Riawan, S.T., M.Eng., Ph.D.**
- 2. Ir. Arif Musthofa, M.T.**

**DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING**  
**Faculty of Industrial Technology**  
**Sepuluh Nopember Institute of Technology**  
**Surabaya 2015**



**DESAIN DAN SIMULASI KONVERTER AC-DC-DC  
ISOLATED UNTUK Pengereman Regeneratif  
MOTOR INDUKSI 3 FASA PADA MOBIL LISTRIK**

**TUGAS AKHIR**

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan  
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
Pada**

**Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga  
Jurusan Teknik Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

**Menyetujui :**

**Dosen Pembimbing I**

23/01/15

**Dosen Pembimbing II**

**Dedet Candra Riawan, S.T., M.Eng., Ph.D.**  
**NIP. 19731119 200003 1001**

**Ir. Arif Musthofa, M.T.**  
**NIP. 19660811 199203 1004**



# **DESAIN DAN SIMULASI KONVERTER AC-DC-DC *ISOLATED* UNTUK Pengereman REGENERATIF MOTOR INDUKSI 3 FASA PADA MOBIL LISTRIK**

**Nama** : Muhammad Rizky Akbar  
**Dosen Pembimbing** : 1. Dedet Candra Riawan, S.T., M.Eng., Ph.D.  
2. Ir. Arif Musthofa, M.T.

## **ABSTRAK**

Motor induksi tiga fasa dapat berperan sebagai genarator induksi saat melakukan pengereman regeneratif. Artinya motor induksi tiga fasa tersebut berubah fungsi menjadi penyuplai daya. Pengereman regeneratif dapat dimanfaatkan dengan menyimpan daya dari motor induksi tiga fasa ke media penyimpanan sehingga dapat menekan konsumsi listrik pada kendaraan listrik. Konverter *bidirectional* adalah rangkaian yang mampu memanfaatkan pengereman regeneratif.

Dalam tugas akhir ini, dilakukan manajemen energi pada kendaraan listrik menggunakan konverter AC-DC-DC *isolated* dengan konsep *bidirectional*. Sumber tegangan berasal dari baterai 96 V 100 Ah dinaikkan dua kali menggunakan *High Frequency Transformer* (HFT) dan menjadi 192 V. Tegangan 192 V dari HFT ditingkatkan level tegangannya menjadi 590 V dan masuk ke inverter tiga fasa berbasis *Field Oriented Control* (FOC). Penggerak utama menggunakan motor induksi tiga fasa dengan rating daya 10 HP.

Hasil simulasi menunjukkan bahwa konverter AC-DC-DC *isolated* mampu beroperasi *bidirectional* baik saat motor akselerasi maupun pengereman regeneratif. Untuk uji regeneratif dengan variasi kecepatan, Daya balik yang tersimpan ke baterai mencapai 98.12%. Sedangkan untuk uji regeneratif dengan variasi torsi, daya balik yang tersimpan ke baterai mencapai 99%.

**Kata kunci** : motor induksi tiga fasa, pengereman regeneratif, konverter AC-DC-DC, *isolated*, *bidirectional*, *High Frequency Transformator (HFT)*, baterai

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# **DESIGN AND SIMULATION AC-DC-DC ISOLATED CONVERTER FOR REGENERATIVE BRAKING 3-PHASE INDUCTION MOTOR OF ELECTRIC VEHICLE**

**Name : Muhammad Rizky Akbar**  
**Advisors : 1. Dedet Candra Riawan, S.T., M.Eng., Ph.D.**  
**2. Ir. Arif Musthofa, M.T.**

## **ABSTRACT**

A three phase induction motor can serve as induction generator when on regenerative braking condition. It means that three phase induction motor change the mode to a supplier of power. The advantages of regenerative braking can be used to store power from a three phase induction motor to the storages so the electric consumption of electric vehicles can be reduced. A bidirectional converter capable of get that advantages from regenerative braking.

In this final project, conducted the management energy on electric vehicles using AC-DC-DC isolated converter with bidirectional concept. The source using battery 96 V 100 Ah get raised twice using High Frequency Transformator (HFT) and become 192 V. The 192 V of votages from HFT are improved that voltage level until 590 V and enter to three phase inverter based on Field Oriented Controlled (FOC). The motor drive using three phase induction motor with power rated 10 HP.

Simulation results shows that AC-DC-DC isolated converter capable of operating bidirectional either while motor acceleration and regenerative braking. Regenerative test of speed variations show that 98.12% reverse power could charged into battery. For regenerative test of load-torque variations show that 99% reverse power could charged into battery.

**Keyword : three phase induction motor, regenerative braking, AC-DC-DC converter, isolated, bidirectional, High Frequency Transformator (HFT), battery**

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## KATA PENGANTAR

Syukur alhamdulillah penulis munajatkan kehadiran Allah SWT, atas anugrah dan ridho-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir yang berjudul :

“DESAIN DAN SIMULASI KONVERTER AC-DC-DC *ISOLATED* UNTUK PENEREMAN REGENERATIF MOTOR INDUKSI 3 FASA PADA MOBIL LISTRIK”.

Tugas akhir ini disusun untuk memenuhi salah satu persyaratan memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Selama menjadi mahasiswa reguler S1 penulis mendapatkan banyak pengalaman dan ilmu yang bermanfaat. Dengan selesainya tugas akhir ini, penulis mengucapkan terima kasih pada :

1. Ayahanda Cipto Sutara, Ibunda Lindarwati dan seluruh keluarga tercinta yang tiada henti memotivasi dan mendoakan penulis selama menempuh pendidikan tinggi.
2. Bapak Dedet Candra Riawan, S.T., M.Eng., Ph.D. dan Bapak Ir. Arif Mustofa, M.T., selaku dosen pembimbing I dan II. Beliau telah membimbing penulis, memberikan saran, arahan dengan ramah dan penuh semangat untuk menyelesaikan tugas akhir ini.
3. Bapak Dr. Tri Arif Sardjono, ST.,M.T., selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro ITS, serta Bapak Ir. Teguh Yuwono selaku Koordinator Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga.
4. Segenap dosen Jurusan Teknik Elektro ITS, yang telah memberikan ilmu yang bermanfaat.
5. DIKTI yang telah memberikan beasiswa Bidikmisi sehingga penulis berkesempatan melanjutkan pendidikan yang lebih tinggi.
6. Segenap keluargaku yang selalu mendukung, memotivasi sehingga penulis terus berjuang menyelesaikan studi ini.
7. Teman-teman asisten Laboratorium Konversi Energi Listrik.
8. Rekan-rekan mahasiswa e50 yang telah menemani penulis sejak awal masuk kuliah.
9. Teman-teman UKM Bridge ITS yang telah memberikan banyak pengalaman dan berjuang meraih prestasi.
10. Sahabat-sahabat kos Keputih Gg. Makam E.10 yang telah membantu dan tempat bertukar pikiran semasa kuliah.
11. Semua pihak yang tidak bisa penulis sebutkan satu persatu.



Besar harapan penulis tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi penelitian selanjutnya dan membawa kebaikan bagi pembaca. Kritik dan saran yang membangun sangat dibutuhkan penulis.

Surabaya, Januari 2015

Penulis

# DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL</b>	
<b>LEMBAR PERNYATAAN</b>	
<b>LEMBAR PENGESAHAN</b>	
<b>ABSTRAK</b>	i
<b>ABSTRACT</b>	iii
<b>KATA PENGANTAR</b>	v
<b>DAFTAR ISI</b>	vii
<b>DAFTAR GAMBAR</b>	xi
<b>DAFTAR TABEL</b>	xiii

## BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang	1
1.2 Permasalahan	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Metodologi Penelitian	3
1.6 Sistematika Penulisan	4
1.7 Relevansi	5

## BAB 2 KONVERTER AC-DC-DC *ISOLATED* UNTUK PENGGEREMAN REGENERATIF MOTOR INDUKSI TIGA FASA PADA MOBIL LISTRIK

2.1 Mobil Listrik	7
2.2 Baterai Lithium Ion (Li-Ion)	9
2.3 Konverter DC-DC <i>isolated</i>	11
2.3.1 Rangkaian Konverter Primer	12
2.3.2 High Frequency Transformer (HFT)	13
2.3.3 Rangkaian Konverter Sekunder	13
2.4 Mode Operasi Boost	14
2.4.1 Analisis Saklar Konduksi	15
2.4.2 Analisis Saklar Terbuka	16
2.4.3 Parameter Rangkaian	17
2.5 Konverter Tiga Fasa	18
2.5.1 Analisis Konverter Tiga Fasa Sebagai Inverter	19

2.5.2 Analisis Konverter Tiga Fasa Sebagai Penyearah .....	20
2.6 Field Oriented Control (FOC) .....	21
2.6.1 <i>Indirect Field Oriented Control</i> (IFOC) .....	22
2.6.2 Transformasi Clark .....	23
2.6.3 Transformasi Park .....	23
2.7 Kontroler Otomatis .....	24
2.7.1 Kontroler Proporsional .....	25
2.7.2 Kontroler Integral .....	25
2.8 <i>Pulse Width Modulation</i> (PWM) .....	25
2.9 Motor Induksi Tiga Fasa .....	25
2.9.1 Konstruksi Motor .....	27
2.9.2 Prinsip Kerja .....	27
2.9.3 Rangkaian Ekuivalen .....	28
2.9.4 Pengereman Regeneratif Motor Induksi Tiga Fasa .....	31

### **BAB 3 PEMODELAN KONVERTER AC-DC-DC *ISOLATED* UNTUK Pengereman REGENERATIF MOTOR INDUKSI TIGA FASA**

3.1 Skema Konverter AC-DC-DC <i>Isolated</i> .....	35
3.2 Pemodelan Baterai Lithium Ion .....	36
3.3 Konverter DC-DC <i>Isolated</i> .....	40
3.3.1 Analisis Kondisi Akselerasi .....	40
3.3.2 Analisis Kondisi Regeneratif .....	43
3.4 Analisis Mode Boost .....	44
3.5 Konverter Tiga Fasa .....	46
3.6 <i>Indirect Field Oriented Control</i> (IFOC) .....	48
3.7 Pemodelan Motor Induksi Tiga Fasa .....	50
3.8 Pengujian Regeneratif .....	50
3.8.1 Pengujian dengan Kecepatan Bervariasi .....	52
3.8.2 Pengujian dengan Torsi Beban Bervariasi .....	52

### **BAB 4 PENGUJIAN SISTEM DAN ANALISIS DATA**

4.1 Pengujian Sistem dengan Kecepatan Bervariasi .....	54
4.2 Pengujian Sistem dengan Torsi Beban Bervariasi .....	58

## **BAB 5 PENUTUP**

5.1 Kesimpulan .....	63
5.2 Saran .....	63

<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>65</b>
-----------------------------	-----------

<b>RIWAYAT HIDUP PENULIS .....</b>	<b>67</b>
------------------------------------	-----------

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Data motor penggerak mobil listrik.....	7
Tabel 2.2	Mode konduksi saklar rankaian konverter primer .....	12
Tabel 2.3	Kombinasi mde konduksi saklar konverter primer dan konverter sekunder .....	14
Tabel 2.4	Mode konduksi saklar konverter tiga fasa sebagai inverter .....	19
Tabel 3.1	Parameter baterai “Ion Battery Pack Art. Nr. 40290231” .....	36
Tabel 3.2	Parameter baterai pada modul SIMULINK.....	38
Tabel 3.3	Mode pensaklaran pada kondisi akselerasi.....	41
Tabel 3.4	Mode pensaklaran pada kondisi regeneratif .....	43
Tabel 3.5	Parameter motor induksi tiga fasa yang digunakan.....	50



*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Konfigurasi dari mobil listrik .....	8
Gambar 2.2	Kurva dinamika kecepatan pada uji kemudi kendaraan.....	8
Gambar 2.3	Karakteristik sel dari jenis baterai .....	9
Gambar 2.4	Bagian-bagian baterai lithium ion .....	10
Gambar 2.5	Rangkaian konverter DC-DC isolated .....	11
Gambar 2.6	Rangkaian konverter primer .....	12
Gambar 2.7	Rangkaian konverter sekunder .....	14
Gambar 2.8	Rangkaian konverter boost .....	15
Gambar 2.9	Rangkaian ekivalen konverter boost saat saklar konduksi .....	15
Gambar 2.10	Rangkaian ekivalen konverter boost saat saklar terbuka .....	16
Gambar 2.11	Topologi konverter tiga fasa .....	18
Gambar 2.12	Rangkaian sederhana penyearah 6-pulsa .....	20
Gambar 2.13	Cara kerja penyearah 6-pulsa.....	21
Gambar 2.14	Sistem kontrol otomatis .....	24
Gambar 2.15	Cara kerja PWM.....	26
Gambar 2.16	Penampang stator dan rotor motor induksi.....	27
Gambar 2.17	Rangkaian ekivalen d-q motor induksi tiga fasa .....	29
Gambar 2.18	Kurva karakteristik motor induksi.....	32
Gambar 2.19	Regeneratif pada kecepatan yang bervariasi .....	33
Gambar 2.20	Regeneratif pada kondisi lintasan yang bervariasi .....	34
Gambar 3.1	Skema konverter AC-DC-DC isolated .....	35
Gambar 3.2	Rangkaian ekivalen baterai pada modul SIMULINK .....	37
Gambar 3.3	Karakteristik baterai lithium ion yang diperoleh .....	39
Gambar 3.4	Pemodelan baterai pada PSIM .....	40
Gambar 3.5	Kombinasi tegangan konverter DC-DC <i>isolated</i> kondisi akselerasi .....	41
Gambar 3.6	Aliran daya pada kondisi akselerasi .....	42
Gambar 3.7	Kombinasi tegangan konverter DC-DC <i>isolated</i> kondisi Regeneratif .....	43
Gambar 3.8	Aliran daya pada kondisi regeneratif.....	44
Gambar 3.9	Konverter boost .....	45
Gambar 3.10	Rangkaian ekivalen konverter boost .....	46
Gambar 3.11	Rangkaian konverter tiga fasa .....	47
Gambar 3.12	Skema rangkaian IFOC .....	48

Gambar 3.13 (a) arus tiga fasa .....	49
(b) vektor arus koordinat d-q.....	49
Gambar 3.14 Model transformasi Park.....	49
Gambar 3.15 Grafik variasi kecepatan yang diujikan.....	52
Gambar 4.1 Kurva pengujian kecepatan bervariasi .....	53
Gambar 4.2 Kurva pengujian torsi beban bervariasi.....	53
Gambar 4.3 Kurva kecepatan referensi dan respon kecepatan motor ....	54
Gambar 4.4 Kurva torsi beban dan respon torsi motor .....	55
Gambar 4.5 Kurva daya baterai, daya DC-bus dan daya motor.....	55
Gambar 4.6 Perbandingan nilai daya negatif baterai dan motor .....	56
Gambar 4.7 Arus tiga fasa yang masuk ke motor .....	57
Gambar 4.8 SOC baterai .....	57
Gambar 4.9 Kurva respon torsi yang dihasilkan motor dan torsi beban.....	58
Gambar 4.10 Kurva kecepatan referensi dan respon kecepatan motor ..	59
Gambar 4.11 Kurva daya baterai, daya DC-bus dan daya motor.....	60
Gambar 4.12 Perbandingan nilai daya negatif baterai dan motor .....	60
Gambar 4.13 Arus tiga fasa yang masuk ke motor .....	61
Gambar 4.14 SOC baterai .....	61

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Mobil merupakan salah satu alat transportasi yang umumnya menggunakan penggerak *Internal Combustion Engine* (ICE). ICE membutuhkan Bahan Bakar Minyak (BBM) sebagai sumber energinya. Keluaran dari ICE adalah zat sisa berupa emisi gas buang yang berpotensi menimbulkan polusi udara. Selain itu, di Indonesia persediaan cadangan minyak bumi semakin menipis padahal konsumsi BBM untuk transportasi masuk dalam skala besar. Mobil listrik adalah solusi menggantikan mobil dengan penggerak ICE. Alasannya adalah mobil listrik dapat menjadi salah satu strategi mengatasi krisis BBM dan polusi udara akibat emisi gas[1].

Secara umum, komponen utama pada mobil listrik terdiri dari baterai, komponen elektronika daya, dan motor listrik. Baterai merupakan sumber energi dari mobil listrik yang menggunakan tegangan/arus searah (DC). Karena keluaran dari baterai adalah tegangan/arus DC, akan sesuai jika penggerak mobil listrik adalah motor DC. Tetapi dalam implementasinya, motor DC memiliki kelemahan yakni inersia yang kecil, adanya sikat dan komutator menyebabkan perlu perawatan rutin dan berkala. Hal ini mengakibatkan penggunaan motor DC kurang efektif, sehingga motor DC perlahan digantikan oleh motor induksi. Saat ini, jenis motor induksi yang paling banyak digunakan sebagai penggerak mobil listrik adalah motor induksi tiga fasa[2]. Kecenderungan penggunaan motor induksi berdasarkan keunggulannya antara lain konstruksi sederhana dan kokoh, rugi gesek dapat direduksi karena tidak memiliki sikat, perawatan mudah, dan harga motor induksi relatif lebih murah[3].

Saat ini penelitian tentang mobil listrik terus berlanjut. Salah satu perkembangannya adalah pengereman regeneratif[2]. Pada kondisi regeneratif, motor induksi berperan sebagai generator induksi yang menghasilkan daya listrik. Kondisi regeneratif dapat diperoleh melalui gerak mekanik dari motor induksi, yakni ketika kecepatan putar rotor lebih cepat dari kecepatan sinkron. Maka dari itu, untuk memanfaatkan kondisi regeneratif, komponen elektronika daya dari mobil listrik perlu dikembangkan konverter dengan konsep aliran daya dua arah (*bidirectional*)[4]. Konsep *bidirectional* merupakan solusi untuk

menekan konsumsi bahan bakar listrik, karena konsep ini memanfaatkan kondisi regeneratif dari motor induksi. Sehingga energi listrik yang dihasilkan oleh motor induksi dapat disimpan kembali ke dalam baterai.

Konverter dengan konsep *bidirectional* umumnya terhubung langsung (*non-isolated*). Artinya dari sisi masukan hingga sisi keluaran rangkaian tidak memiliki isolasi atau sekat pemisah. Dari segi biaya rangkaian *non-isolated* memang lebih ekonomis. Namun salah satu kelemahan terbesarnya adalah jika terjadi gangguan, maka antara sisi masukan dan sisi keluaran sulit untuk diproteksi karena rangkaian terhubung menjadi satu rangkaian tertutup. Oleh karena itu, konverter dengan konsep *bidirectional* dapat dibuat terpisah (*isolated*) dengan sekat transformator[5]. Hal ini bertujuan jika terjadi gangguan disalah satu sisi maka efek dari gangguan tersebut tidak berimbas pada sisi lainnya atau dapat diminimalkan.

Pada tugas akhir ini, akan dibahas perancangan dan simulasi konverter AC-DC-DC *isolated* dengan konsep *bidirectional* untuk memanfaatkan kondisi regeneratif dari motor induksi tiga fasa pada mobil listrik. Dalam perancangannya, konverter ini meliputi baterai lithium ion sebagai sumber tegangan dan media penyimpanan; konverter DC-DC *isolated* yang terdiri dari konverter primer, *High Frequency Transformator* (HFT), dan konverter sekunder; konverter boost; konverter tiga fasa yang dikontrol oleh *Indirect Field Oriented Control* (IFOC); dan motor induksi tiga fasa sebagai penggerak mobil listrik.

## 1.2 Perumusan Masalah

Permasalahan yang dibahas dalam tugas akhir ini adalah desain konverter AC-DC-DC *isolated* dengan konsep *bidirectional*, strategi pensaklaran dari masing-masing konverter, pemodelan motor induksi tiga fasa pada kondisi regeneratif agar daya dapat tersimpan kembali ke media penyimpanan.

## 1.3 Batasan Masalah

Pada tugas akhir ini permasalahan dibatasi sebagai berikut:

1. Pemodelan dan simulasi menggunakan perangkat lunak.
2. Pemodelan hanya fokus pada *drive* motor induksi tiga fasa tanpa memperhatikan model *drive-train* dari mobil listrik.

3. Variasi kecepatan referensi motor dibatasi 70 km/jam (743.1 rpm), 40 km/jam (424.6 rpm), 0 rpm (0 km/jam), torsi beban motor konstan 3 Nm dengan kelembaman 0.01 Nm.
4. Variasi torsi beban referensi motor dibatasi 10 Nm, -7 Nm, 5 Nm, dan -4 Nm dengan kelembaman 0.01 Nm untuk kecepatan motor konstan 30 km/jam (318.5 rpm).

## 1.4 Tujuan Penelitian

Penelitian pada tugas akhir ini bertujuan untuk menyajikan simulasi dan analisis terkait konverter AC-DC-DC *isolated* dengan konsep *bidirectional* untuk pengereman regeneratif motor induksi tiga fasa. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat terus dikembangkan dan nantinya dapat menjadi referensi dalam pembuatan kendaraan listrik yang efisien.

## 1.5 Metodologi Penelitian

Metodologi yang digunakan pada penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Studi Literatur  
Mencari dan mempelajari referensi dari jurnal ilmiah, buku tugas akhir, artikel-artikel terkait pengereman regeneratif pada motor induksi tiga fasa, prinsip konverter AC-DC-DC *isolated* dengan konsep *bidirectional*, memahami aliran daya rangkaian dan metode pensaklaran dari masing-masing bagian konverter.
2. Pengumpulan Data  
Mengumpulkan data terkait parameter-parameter dari motor induksi tiga fasa dan baterai jenis lithium ion yang akan digunakan untuk pemodelan.
3. Pemodelan dan Simulasi  
Melakukan perhitungan untuk memperoleh parameter-parameter dari rangkaian, selanjutnya pemodelan dan simulasi konverter AC-DC-DC *isolated* dengan konsep *bidirectional* menggunakan perangkat lunak. Pemodelan dan simulasi ini meliputi baterai lithium ion, konverter DC-DC *isolated*, konverter boost,



konverter tiga fasa yang dikontrol oleh *Indirect Field Oriented Control* (IFOC), dan motor induksi tiga fasa.

#### 4. Analisis Data

Analisis data meliputi perbandingan kecepatan referensi dengan respon kecepatan aktual motor; torsi beban referensi dengan respon torsi motor; daya pada baterai, konverter boost dan motor induksi tiga fasa; arus tiga fasa yang masuk ke motor; SOC (*State of Charge*) baterai.

#### 5. Penulisan Buku Tugas Akhir

Penulisan buku merupakan laporan serangkaian kegiatan selama pengerjaan tugas akhir. Pemaparan teori-teori penunjang seputar konverter AC-DC-DC *isolated* dengan konsep *bidirectional* untuk pengereman regeneratif dari motor induksi tiga fasa sebagai penggerak mobil listrik.

### 1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan laporan tugas akhir ini dibagi menjadi lima bab dengan masing-masing bab diuraikan sebagai berikut :

1. BAB I merupakan pendahuluan yang berisi latar belakang, perumusan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian, metodologi penelitian, sistematika penulisan, dan relevansi.
2. BAB II berisi teori penunjang yang membahas tentang mobil listrik, baterai lithium ion, konverter DC-DC *isolated*, konverter boost, konverter tiga fasa, *Field Oriented Control* (FOC), kontrol otomatis, *Pulse Width Modulation* (PWM), dan motor induksi tiga fasa.
3. BAB III berisi tentang uraian dari topologi yang disimulasikan dan penentuan parameter masing-masing komponen yang dijabarkan melalui analisis matematis untuk mempermudah simulasi.
4. BAB IV berisi tentang hasil pengujian dan analisis terhadap simulasi yang dilakukan.
5. BAB V berisi tentang kesimpulan dan saran terhadap penelitian yang telah dilakukan.

## **1.7 Relevansi**

Hasil yang diperoleh dari tugas akhir ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut.

1. Dapat dijadikan referensi penelitian selanjutnya terkait dalam hal peningkatan efisiensi daya melalui sistem pengereman regeneratif pada kendaraan listrik.
2. Dapat menjadi referensi bagi mahasiswa lain yang hendak mengambil masalah serupa untuk tugas akhirnya.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## **BAB II**

### **KONVERTER AC-DC-DC *ISOLATED* UNTUK PENGGEREMAN REGENERATIF MOTOR INDUKSI TIGA FASA PADA MOBIL LISTRIK**

#### **2.1 Mobil Listrik**

Mobil listrik merupakan kendaraan penumpang untuk pribadi atau umum yang digerakkan secara elektrik. Mobil listrik menggunakan motor listrik sebagai penggerak utama. Tabel 2.1 merupakan jenis-jenis motor penggerak yang dipasarkan oleh produsen mobil listrik.

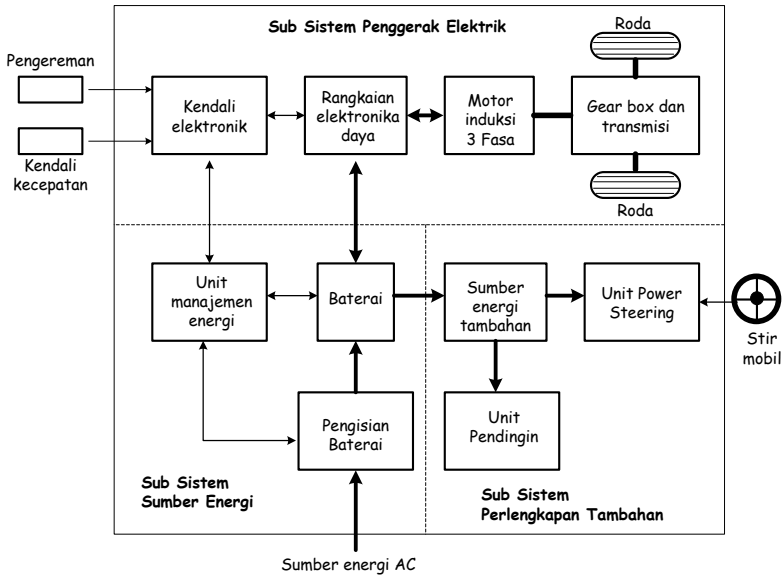
**Tabel 2.1** Data motor penggerak mobil listrik yang dipasarkan[6]

No.	Merk mobil listrik	Motor penggerak
1	Fiat Panda Electra	Motor DC seri
2	Mazda Bongo	Motor DC shunt
3	Copceptor Gvan	Motor DC eksitasi terpisah
4	Suzuki Senior Tricycle	Motor DC magnet permanen
5	Fiat Seicento Electra	Motor induksi
6	Ford Think City	Motor induksi
7	GM EV 1	Motor induksi
8	Honda EV Plus	Motor sinkron magnet permanen
9	Nissan Altra	Motor sinkron magnet permanen
10	Chloride Lucas	Motor switch reluctance

Ada 3 faktor utama yang digunakan sebagai pertimbangan untuk memilih penggerak elektrik pada mobil listrik, yaitu[7] :

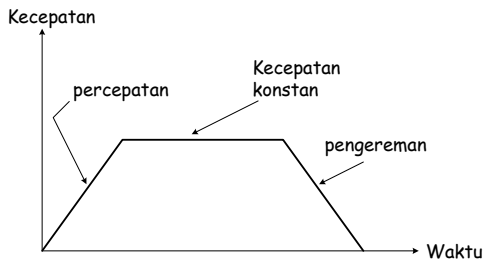
1. Kemampuan yang diharapkan (akselerasi, kecepatan maksimum, kemampuan menempuh jalan menanjak, pengereman, dan jarak tempuh)
2. Kendali mobil (tipe mobil, berat mobil dan perlengkapan mobil)
3. Sumber energi (baterai, fuel cell, kapasitor, dan sumber hibrid lainnya).

Konfigurasi dari mobil listrik pada Gambar 2.1 terdiri dari tiga sub sistem utama yakni sub sistem penggerak elektrik, sub sistem sumber energi dan subsistem perlengkapan tambahan.



**Gambar 2.1** Konfigurasi dari mobil listrik[7]

Dinamika kecepatan yang terdiri dari percepatan dan pengereman menjadi indikator utama dalam uji kemudi dari mobil listrik. Uji kemudi tersebut secara umum terdiri dari fase percepatan, kecepatan konstan, pengereman dan fase stasioner, ditunjukkan oleh Gambar 2.2.

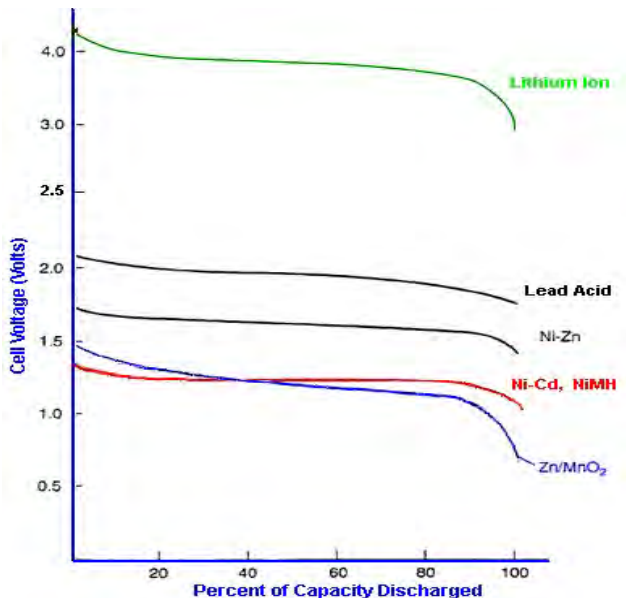


**Gambar 2.2** Kurva dinamika kecepatan pada uji kemudi kendaraan

## 2.2 Baterai Lithium Ion (Li-Ion)

Baterai adalah komponen utama pada kendaraan listrik. Baterai merupakan sumber energi listrik dari kendaraan listrik. Pemilihan baterai yang tepat dapat meningkatkan performa kendaraan listrik. Umumnya ada dua jenis yang biasa dipakai untuk kendaraan listrik yaitu baterai jenis lithium ion dan lead acid. Masing-masing baterai memiliki keunggulan dan kelemahan tergantung kebutuhan dari penggunaannya.

Baterai Li-Ion merupakan teknologi yang menjanjikan untuk sebuah media penyimpanan, karena keunggulan dari baterai ini adalah kapasitas daya yang besar namun memiliki dimensi yang kecil dan ringan. Kerapatan energi sekitar dua kali dari baterai berbasis nikel, baterai Li-Ion dapat mengirim energi pada kapasitas yang diinginkan namun berat dari baterai lebih ringan. Lithium ion juga memiliki tegangan sel yang tiga kali lebih besar dibandingkan dengan baterai NiCd dan NiMH dapat dilihat pada Gambar 2.3. Oleh karena itu lebih sedikit sel yang dibutuhkan untuk suatu level tegangan yang dibutuhkan[8].

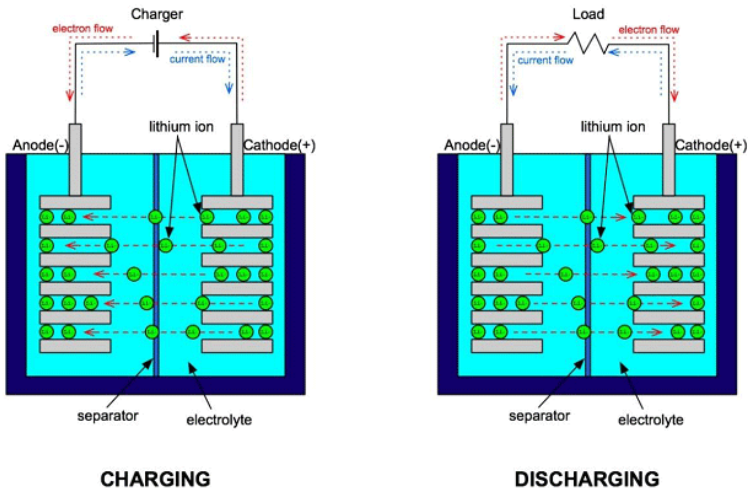


**Gambar 2.3** Karakteristik sel dari jenis baterai[8]



Pada penelitian ini, dikhususkan menggunakan baterai lithium ion sebagai sumber dari sistem. Keunggulan dari baterai lithium ion adalah ukuran lebih kecil dan tidak berat. Meskipun tegangan pada baterai kecil, daya dari baterai lithium ion tidak kalah dengan baterai jenis lain, hal ini dikarenakan *Ampere/hour* (Ah) baterai lithium ion besar. Dari keunggulan ini baterai lithium ion cocok sebagai sumber energi serta media penyimpanan pada mobil listrik.

Baterai lithium ion adalah salah satu baterai tipe sekunder atau dapat diisi ulang. Baterai jenis ini diharap mampu mengatasi permasalahan kebutuhan energi dan tuntutan energi bersih. Bagian-bagian dari baterai lithium ion pada Gambar 2.4 terdiri dari anoda, elektrolit, separator, dan katoda.



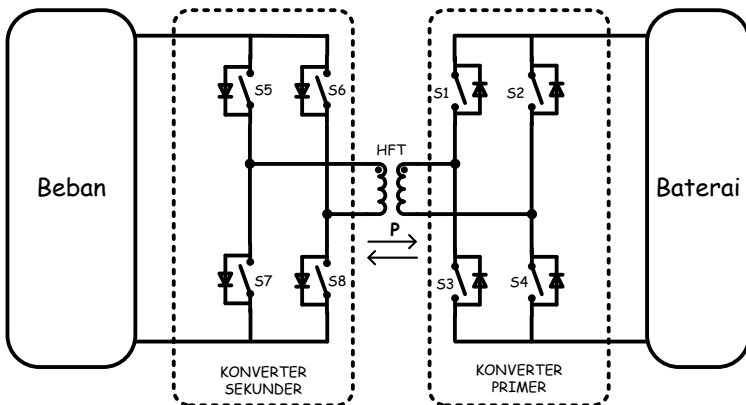
**Gambar 2.4** Bagian-bagian baterai lithium ion[8]

Umumnya, katoda dan anoda terdiri dari dua bagian, yaitu material aktif sebagai tempat masuk dan keluarnya ion lithium dan sebagai pengumpul elektron. Proses dihasilkannya listrik pada baterai lithium ion adalah ketika anoda dan katoda terhubung, maka elektron akan mengalir dari anoda menuju katoda, sehingga listrik mulai mengalir. Pada keadaan berbeban, aliran arus bergerak dari anoda (+) menuju katoda (-), pergerakan elektron dari ion lithium bergerak dari anoda (-) menuju katoda (+). Saat terjadi pengisian daya (*charging*),

aliran arus bergerak dari anoda (-) menuju katoda (+), pergerakan elektron dari ion lithium bergerak dari katoda (+) menuju anoda (-).

### 2.3 Konverter DC-DC *Isolated*

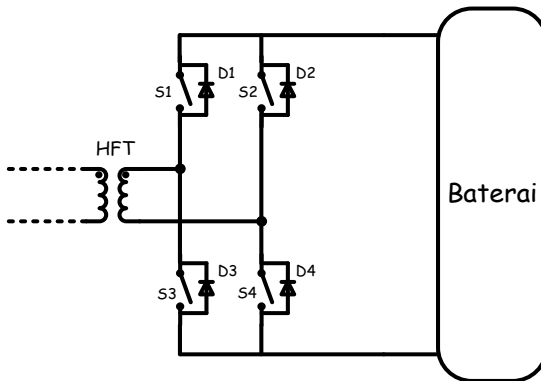
Konverter DC-DC *isolated* adalah rangkaian *bidirectional* yang diisolasi oleh transformator [9]. Tujuannya adalah jika terjadi gangguan disalah satu sisi, maka efek dari gangguan tersebut dapat direduksi sehingga tidak berimbas kesisi lainnya. Baterai yang menjadi sumber energi dari mobil listrik menggunakan tegangan/arus searah (DC). Tegangan/arus DC tidak dapat melewati isolasi transformator karena pada tegangan/arus DC tidak memiliki perubahan fluks terhadap waktu. Konverter DC-DC *isolated* berfungsi membawa tegangan/arus DC melewati transformator. Konverter DC-DC *isolated* pada Gambar 2.5 terdiri dari 4 saklar disisi primer (konverter primer), *High Frequency Transformer* (HFT), dan 4 saklar disisi sekunder (konverter sekunder)[5]. Ketika motor akselerasi, aliran daya bergerak dari baterai menuju beban. Pada keadaan ini konverter primer berperan sebagai inverter dan dioda *free wheeling* dari konverter sekunder berperan sebagai penyearah. Sebaliknya ketika motor regeneratif, aliran daya bergerak dari beban menuju baterai maka konverter sekunder berperan sebagai inverter dan dioda *free wheeling* dari konverter primer berperan sebagai penyearah.



**Gambar 2.5** Rangkaian konverter DC-DC *isolated*

### 2.3.1 Rangkaian Konverter Primer

Rangkaian konverter primer pada Gambar 2.6 merupakan bagian dari konverter DC-DC *isolated* yang berada di sisi masukan dekat dengan baterai. Pada saat motor akselerasi, rangkaian ini berfungsi sebagai inverter yang merubah tegangan/arus DC baterai menjadi tegangan/arus persegi. Tegangan/arus persegi ini digunakan untuk melewati HFT, hal ini dikarenakan transformator tidak dapat meloloskan tegangan/arus DC.



**Gambar 2.6** Rangkaian konverter primer

Ketika konverter primer berperan sebagai inverter, operasi kerja rangkaian konverter primer tergantung pada konduksi saklar-saklarnya. Saklar yang segaris ( $S_1$  dengan  $S_3$ ) dan ( $S_2$  dengan  $S_4$ ) tidak boleh konduksi bersamaan dalam satu waktu, karena dapat mengakibatkan hubung singkat pada baterai. Tegangan persegi yang dihasilkan konverter primer memiliki nilai tegangan dengan besar  $V_i$  dan  $-V_i$ . Mode konduksi saklar pada konverter primer ketika berperan sebagai inverter dapat dilihat pada Tabel 2.2.

**Tabel 2.2** Mode konduksi saklar rangkaian konverter primer

No.	Keadaan	$V_o$
1	$S_1, S_4$ on dan $S_2, S_3$ off	$V_i$
2	$S_2, S_3$ on dan $S_1, S_4$ off	$-V_i$
3	$S_1, S_2$ on dan $S_3, S_4$ off	0
4	$S_3, S_4$ on dan $S_1, S_2$ off	0

Kemudian ketika motor regeneratif, terjadi perubahan aliran daya yakni aliran daya bergerak dari beban menuju baterai sehingga dioda-dioda *free wheeling* pada rangkaian konverter primer berperan sebagai penyearah tak terkontrol yang menyearahkan tegangan/arus persegi dari konverter sekunder menjadi tegangan/arus DC.

### 2.3.2 High Frequency Transformer (HFT)

*High Frequency Transformer* (HFT) merupakan transformator frekuensi tinggi yang berfungsi sebagai isolasi atau sekat antara konverter primer dan konverter sekunder. Karena konverter primer dan konverter sekunder umumnya menggunakan frekuensi tinggi dalam pensaklarannya, maka dari itu HFT cocok digunakan sebagai isolasi. Selain itu, HFT memiliki dimensi lebih kecil dibandingkan dengan transformator frekuensi rendah. HFT juga berfungsi sebagai penaik (*step up*) atau penurun (*step down*) tegangan. Nilai tegangan yang dihasilkan tergantung dari perbandingan jumlah belitan antara sisi tegangan tinggi dan sisi tegangan rendah.

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p}{N_s} \quad (2.1)$$

dimana

$V_p$  = tegangan sisi primer

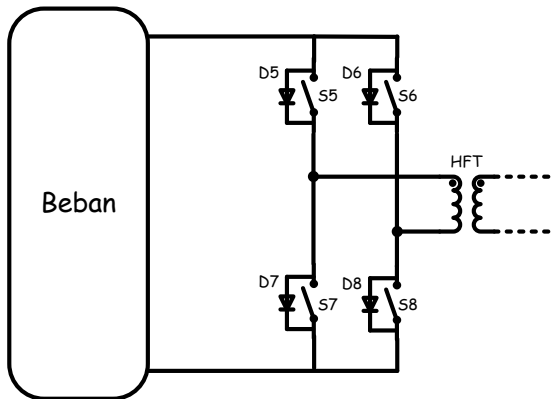
$V_s$  = tegangan sisi sekunder

$N_p$  = jumlah belitan sisi primer

$N_s$  = jumlah belitan sisi sekunder

### 2.3.3 Rangkaian Konverter Sekunder

Rangkaian konverter sekunder pada Gambar 2.7 juga termasuk bagian dari konverter DC-DC *isolated* yang berada di sisi tegangan tinggi dari transformator. Operasi kerja konverter sekunder berkebalikan dengan konverter primer. Pada kondisi motor akselerasi, konverter primer berperan sebagai inverter dan konverter sekunder berperan sebagai penyearah. Sebaliknya jika motor regeneratif, konverter sekunder berperan sebagai inverter dan konverter primer berperan sebagai penyearah. Untuk mode konduksi saklar sama dengan konverter sekunder, saklar yang segaris ( $S_5$  dengan  $S_7$ ) dan ( $S_6$  dengan  $S_8$ ) pada konverter primer tidak boleh konduksi bersamaan dalam satu waktu.



**Gambar 2.7** Rangkaian konverter sekunder

Operasi kerja rangkaian konverter sekunder dapat dilihat dari dua keadaan yakni saat motor akselerasi dan motor regeneratif. Tabel 2.3 merupakan kombinasi mode konduksi saklar ketika motor akselerasi dan motor regeneratif.

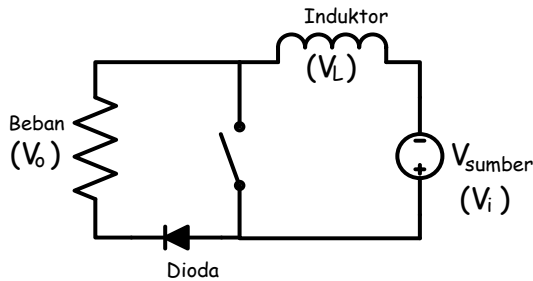
**Tabel 2.3** Kombinasi mode konduksi saklar konverter primer dan konverter sekunder

	konverter primer	konverter sekunder
Motor akselerasi	S <sub>1</sub> , S <sub>4</sub> on	D <sub>7</sub> , D <sub>6</sub>
	S <sub>2</sub> , S <sub>3</sub> on	D <sub>8</sub> , D <sub>5</sub>
Motor regeneratif	konverter sekunder	konverter primer
	S <sub>5</sub> , S <sub>8</sub> on	D <sub>1</sub> , D <sub>4</sub>
	S <sub>6</sub> , S <sub>7</sub> on	D <sub>2</sub> , D <sub>3</sub>

## 2.4 Mode Operasi Boost

Konverter boost adalah rangkaian elektronika yang dapat menghasilkan tegangan keluaran DC yang lebih besar dari tegangan masukannya. Konverter boost terdiri dari induktor yang dipasang seri dengan tegangan sumber, saklar, dan dioda. Ketika saklar konduksi, induktor tersebut akan terhubung langsung dengan tegangan sumber. Besarnya tegangan keluaran dapat divariasikan dengan mengatur pensaklaran (*duty cycle*).

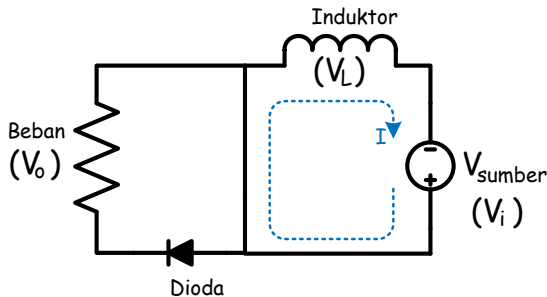
Pada konverter AC-DC-DC *isolated* ini, tegangan keluaran DC dari konverter DC-DC *isolated* perlu ditingkatkan nilainya, karena tegangan tersebut masih terlalu kecil untuk diinverter menjadi sinyal tiga fasa yang memikul beban motor. Maka dari itu, konverter boost yang berperan untuk menaikkan tegangan DC tersebut. Pada kondisi akselerasi konverter boost menaikkan tegangan DC dari konverter DC-DC *isolated*. Sedangkan pada kondisi regeneratif saklar pada konverter boost padam. Dalam menganalisis konverter boost pada Gambar 2.8 dilakukan saat sistem telah mencapai kondisi stabil atau *steady state*.



**Gambar 2.8** Rangkaian konverter boost

#### 2.4.1 Analisis Saklar Konduksi

Analisis operasi kerja saat saklar konduksi pada konverter boost mengacu pada Gambar 2.9.



**Gambar 2.9** Rangkaian ekivalen konverter boost saat saklar konduksi

Saat saklar konduksi, dioda akan mengalami bias mundur karena nilai katoda lebih besar dari nilai anoda. Rangkaian Gambar 2.10 dapat dianalisis berdasarkan Hukum Tegangan Kirchoff, sehingga didapatkan beberapa persamaan sebagai berikut.

$$V_i = V_L \quad (2.2)$$

$$V_L = L \frac{di}{dt} \quad (2.3)$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{V_{in}}{L} \quad (2.4)$$

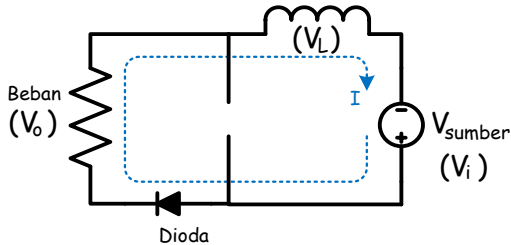
Posisi saklar yang konduksi dan padam secara kontinyu, akan mengakibatkan arus yang mengalir pada induktor naik secara linear. Besar *ripple* arus yang mengalir dirumuskan pada persamaan (2.5) dan besar riak arus yang mengalir saat posisi saklar tertutup terdapat pada persamaan (2.6)

$$\frac{\Delta i}{DT} = \frac{V_i}{L} \quad (2.5)$$

$$\Delta i_{konduksi} = \frac{V_i \cdot D \cdot T}{L} \quad (2.6)$$

#### 2.4.2 Analisis Saklar Terbuka

Untuk menganalisis operasi kerja dari konverter ketika saklar terbuka pada Gambar 2.10. Saat posisi saklar membuka, dioda akan menjadi bias maju. Induktor yang awalnya *charge* akan menjadi *discharge* sebagai sumber tegangan.



**Gambar 2.10** Rangkaian ekuivalen konverter boost saat saklar terbuka

Berdasarkan analisis Hukum Tegangan Kirchoff dari Gambar 2.10 diperoleh persamaan sebagai berikut.

$$V_i - V_L - V_o = 0 \quad (2.7)$$

$$V_L = V_i - V_o \quad (2.8)$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{V_i - V_o}{L} \quad (2.9)$$

Frekuensi pensaklaran yang selalu konstan, akan mengakibatkan arus induktor naik secara linear. Perubahan arus induktor dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$\Delta i_{terbuka} = \frac{(V_i - V_o) \cdot (1 - D) \cdot T}{L} \quad (2.10)$$

Dengan menganalisis pada kondisi *steady state*, penjumlahan nilai masukan riak arus saat saklar tertutup dan nilai keluaran riak arus saat saklar terbuka adalah 0. Persamaan rumus tersebut dapat diturunkan sehingga didapat persamaan perhitungan *gain* pada konverter. Turunan persamaan tersebut dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$\Delta i_{tertutup} + \Delta i_{terbuka} = 0 \quad (2.11)$$

$$\frac{V_i \cdot D \cdot T}{L} + \frac{(V_i - V_o) \cdot (1 - D) \cdot T}{L} = 0 \quad (2.12)$$

$$V_o = \frac{V_i}{(1 - D)} \quad (2.13)$$

$$G = \frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{(1 - D)} \quad (2.14)$$

dimana

$G$  = penguatan pada konverter

$V_o$  = tegangan keluaran (V)

$V_i$  = tegangan masukan (V)

$D$  = *duty cycle* (%)

### 2.4.3 Parameter Rangkaian

Pada konverter boost induktor berperan sebagai media penyimpanan arus dan biasanya disisi keluaran pada konverter boost dipasang kapasitor yang berfungsi mereduksi riak tegangan. Selain sebagai media penyimpanan arus induktor juga berfungsi mereduksi riak arus. Nilai induktansi dari induktor konverter boost dapat ditentukan melalui persamaan berikut :

$$L = \frac{V_i \times D}{\Delta I_L \times f_s} \quad (2.15)$$

dimana

$V_i$  = tegangan masukan

$D$  = *duty cycle*

$\Delta I_L$  = riak arus

$f_s$  = frekuensi pensaklaran



Kapasitor harus mampu menjaga suplai arus pada daya tertingginya. Riak tegangan output adalah hasil dari arus yang melalui kapasitor. Persamaan untuk mencari nilai kapasitansi yang dibutuhkan adalah :

$$C = \frac{D}{R \times \left( \frac{\Delta V_o}{V_o} \right) \times f_s} \quad (2.16)$$

dimana

$D$  = duty cycle

$f_s$  = frekuensi pensaklaran

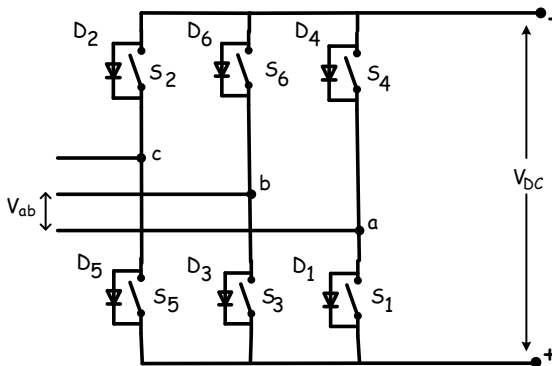
$R$  = resistansi beban

$\Delta V_o$  = riak tegangan keluaran

$V_o$  = tegangan keluaran

## 2.5 Konverter Tiga Fasa

Rangkaian konverter tiga fasa pada konverter AC-DC-DC *isolated* yang diusulkan ini merupakan rangkaian elektronika daya yang dapat bekerja *bidirectional* artinya dapat berfungsi sebagai inverter tiga fasa atau penyearah tiga fasa[10]. Topologi konverter tiga fasa pada Gambar 2.11 terdiri dari 6 buah saklar dan 6 buah dioda *free wheeling*.



**Gambar 2.11** Topologi konverter tiga fasa

Pada kondisi akselerasi konverter tiga fasa berfungsi sebagai inverter yang merubah gelombang DC menjadi gelombang sinus tiga fasa. Besarnya nilai keluaran gelombang sinus tiga fasa yang dihasilkan

dapat divariasikan dengan cara mengatur mode konduksi dari masing-masing saklarnya.

Sebaliknya ketika motor dalam keadaan regeneratif konverter tiga fasa berfungsi sebagai *rectifier* yang menyearahkan gelombang tiga fasa dari motor induksi. Keenam dioda dioda *free wheeling* dari konverter tiga fasa berfungsi sebagai penyearah 6-pulsa tak terkontrol.

### 2.5.1 Analisis Konverter Tiga Fasa Sebagai Inverter

Konverter tiga fasa beroperasi sebagai inverter ketika aliran daya bergerak dari baterai menuju motor atau kondisi akselerasi. Tabel 2.4 menunjukkan mode konduksi saklar dari konverter tiga fasa ketika beroperasi sebagai inverter.

**Tabel 2.4** Mode konduksi saklar konverter tiga fasa sebagai inverter

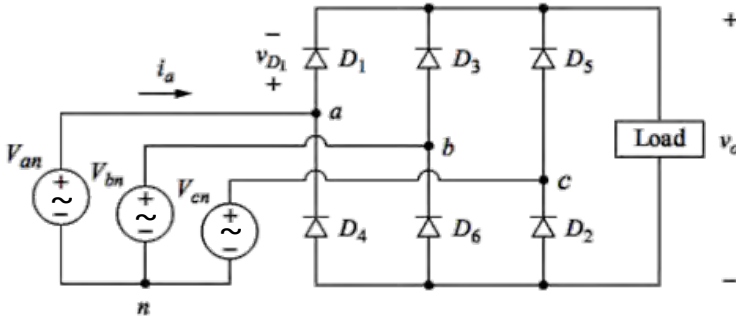
No	Kondisi	$V_{ab}$	$V_{bc}$	$V_{ca}$
1.	$(S_1, S_2, S_6) \text{ on dan } (S_4, S_5, S_3) \text{ off}$	$V_i$	0	$-V_i$
2.	$(S_2, S_3, S_1) \text{ on dan } (S_5, S_6, S_7) \text{ off}$	0	$V_i$	$-V_i$
3.	$(S_3, S_4, S_2) \text{ on dan } (S_6, S_1, S_5) \text{ off}$	$-V_i$	$V_i$	0
4.	$(S_4, S_5, S_3) \text{ on dan } (S_1, S_2, S_6) \text{ off}$	$-V_i$	0	$V_i$
5.	$(S_5, S_6, S_4) \text{ on dan } (S_2, S_3, S_1) \text{ off}$	0	$-V_i$	$V_i$
6.	$(S_6, S_1, S_5) \text{ on dan } (S_3, S_4, S_2) \text{ off}$	$V_i$	$-V_i$	0
7.	$(S_1, S_3, S_5) \text{ on dan } (S_4, S_6, S_2) \text{ off}$	0	0	0
8.	$(S_4, S_6, S_2) \text{ on dan } (S_1, S_3, S_5) \text{ off}$	0	0	0

Saklar yang terletak pada satu lengan ( $S_1$  dan  $S_4$ ,  $S_3$  dan  $S_6$ ,  $S_5$  dan  $S_2$ ) tidak boleh tertutup atau terbuka pada saat yang bersamaan. Apabila saklar dalam satu lengan tertutup secara bersamaan maka akan terjadi hubung singkat pada rangkaian. Sedangkan apabila saklar dalam satu lengan terbuka secara bersamaan maka inverter akan menghasilkan sinyal keluaran yang tidak terdefinisikan.

Berdasarkan Tabel 2.4 terdapat delapan kondisi pensaklaran, dua diantaranya menghasilkan tegangan 0 V di setiap fasanya yakni pada kondisi 7 dan 8, sedangkan 6 lainnya menghasilkan tegangan yang berbeda tiap fasanya. Tegangan output yang mungkin dihasilkan inverter adalah  $V_i$ , 0, dan  $-V_i$ . Sinyal keluaran inverter dapat diatur sesuai dengan yang diinginkan dengan melakukan pemilihan kondisi pensaklaran yang dapat dilakukan dengan teknik modulasi.

### 2.5.2 Analisis Konverter Tiga Fasa Sebagai Penyearah

Pada kondisi regeneratif, konverter tiga fasa berfungsi sebagai rectifier yang menyearahkan gelombang tiga fasa dari motor induksi. Enam dioda dari konverter ini bertugas sebagai penyearah 6-pulsa tak terkontrol. Rangkaian sederhana dari penyearah 6-pulsa dapat dilihat pada Gambar 2.12.

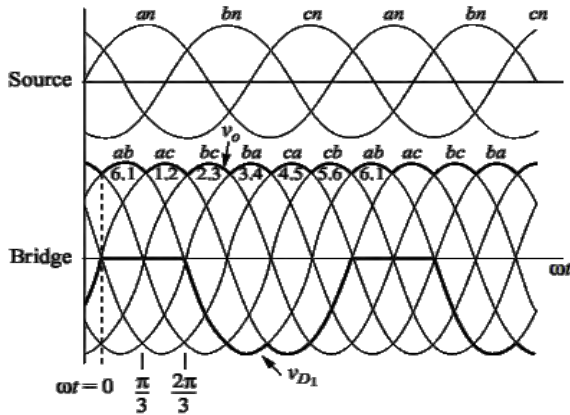


**Gambar 2.12** Rangkaian sederhana penyearah 6-pulsa

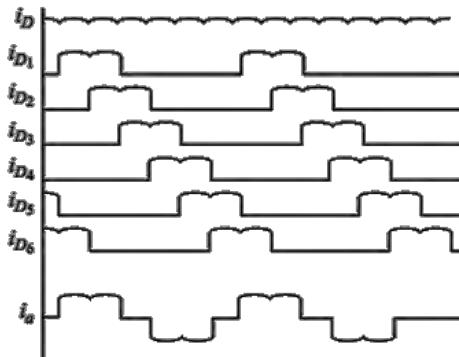
Prinsip dari penyearah 6-pulsa adalah sebagai berikut :

1. Hanya ada 1 dioda dibagian atas yang boleh konduksi dalam satu waktu ( $D_1$ ,  $D_3$  atau  $D_5$ ).
2. Hanya ada 1 dioda dibagian bawah yang boleh konduksi dalam satu waktu ( $D_2$ ,  $D_4$  atau  $D_6$ ).
3. ( $D_1$  dan  $D_4$ ), ( $D_3$  dan  $D_6$ ), ( $D_5$  dan  $D_2$ ) tidak dapat konduksi dalam satu waktu.
4. Tegangan output yang melewati beban merupakan tegangan *line to line* sumber. Contoh, ketika  $D_1$  dan  $D_2$  konduksi tegangan keluannya adalah  $V_{ac}$ .
5. Konduksi dioda ditentukan berdasarkan nilai tegangan *line to line* tertinggi.
6. Ada 6 kombinasi tegangan *line to line* yang masing-masing memiliki selisih sudut  $60^\circ$ .
7. Frekuensi fundamental dari tegangan output adalah  $6 \times f_s$  (dimana,  $f_s$  adalah frekuensi motor induksi pada kecepatan sinkron).

Gambar 2.13 menunjukkan cara kerja penyearah 6-pulsa, dimana pada Gambar ini dapat dilihat tegangan input tiga fasa, tegangan output yang sudah disearahkan dan tegangan salah satu dioda.



(a)



(b)

**Gambar 2.13** Cara kerja penyearah 6-pulsa (a) kondisi tegangan (b) arus beban

## 2.6 Field Oriented Control (FOC)

Ada banyak metode untuk mengontrol kecepatan motor induksi. Salah satunya adalah metode *Field oriented control* (FOC). FOC adalah metode kontrol variabel frekuensi dimana arus tiga fasa pada stator

diidentifikasi menjadi dua komponen ortogonal yang mana dapat divisualisasikan ke dalam vektor. FOC diklasifikasikan menjadi dua macam yaitu *direct field oriented control* dan *indirect field oriented control* (IFOC). Pada tugas akhir ini akan membahas mengenai sistem kontrol motor induksi menggunakan IFOC.

### 2.6.1 Indirect Field Oriented Control (IFOC)

Metode sistem control ini adalah untuk memastikan konsumsi energi oleh motor bekerja pada torsi elektrik yang diinginkan. Pada sistem *indirect field oriented control* tidak diperlukan sebuah sensor untuk mengukur fluks rotor secara langsung. Hal ini menjadikan sistem IFOC lebih sensitif dan efisien dengan tidak digunakannya sebuah sensor fluks. Pada IFOC digunakan sensor arus (*current sensor*) dari a,b,c untuk ditransformasikan ke koordinat d-q.

Persamaan dari metode IFOC didefinisikan dari persamaan yang menghubungkan vector dari fluks rotor terhadap vector arus stator. Hubungan ini, dalam sebuah frame referensi terhadap vector fluks rotor, didefinisikan seperti di bawah [7]:

$$\frac{l_m}{\tau_r} i_{sd}^e = \frac{1}{\tau_r} \varphi_r + \frac{d}{dt} \varphi_r \quad (2.17)$$

$$\theta = \omega_{sl} - \frac{1}{\tau_r} \frac{i_{sq}^e}{i_{sd}^e} \quad (2.18)$$

$$T_e = P l_m \frac{i_{sq}^e}{l_r} \varphi_r \quad (2.19)$$

Dimana *superscript e* mengindikasikan penggunaan fluks rotor frame referensi.

$$\tau_r = l_r / r_r \text{ (rotor time constant)} \quad (2.20)$$

$$\omega_{sl} = \omega_e - \omega_r \text{ (frekuensi slip)} \quad (2.21)$$

Pada metode IFOC, control torsi motor induksi didapat dari  $i_{sq}^e$ , sedangkan fluks rotor dikontrol melalui  $i_{sd}^e$ . Nilai referensi dari  $i_{sq}^e$  dan  $i_{sd}^e$  didefinisikan sebagai berikut[7]:

$$i_{sq}^e = \frac{\left( \frac{4T_e L_r P}{3L_m} \right)}{\varphi_r} \quad (2.22)$$

$$i_{sd}^e = \frac{\varphi_r}{L_m} \quad (2.23)$$

Untuk mendapatkan frekuensi dari vector fluks rotor, didapat dengan menambahkan frekuensi slip ( $\omega_{sl}$ ) ke kecepatan *shaft* ( $\omega_r$ )[7].

$$\omega_e = \omega_{sl} + \omega_r \quad (2.24)$$

$$\omega_e = \frac{i_{sq}^e}{i_{sd}^e} \frac{r_r}{L_r} \quad (2.25)$$

$$\theta = \int \omega_e dt \quad (2.26)$$

### 2.6.2 Transformasi Clark

Untuk mentransformasikan arus stator dari sistem tiga fasa (a,b,c) ke sistem dua fasa orthogonal ( $\alpha, \beta$ ), maka secara matematis persamaan-persamaan transformasi berikut dapat dirumuskan kembali sebagai berikut :

$$I_\alpha = I_a \quad (2.27)$$

$$I_\beta = \frac{1}{\sqrt{3}}I_a + \frac{2}{\sqrt{3}}I_b \quad (2.28)$$

Inverse transformasi Clark digunakan untuk mentransformasikan balik dari komponen  $\alpha, \beta$  ke komponen a,b,c melalui persamaan berikut :

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

### 2.6.3 Transformasi Park

Transformasi ini adalah bentuk yang paling utama didalam metode IFOC. Sesungguhnya, proyeksi ini memodifikasi dua fasa sistem orthogonal ( $\alpha, \beta$ ) didalam d,q pada *rotating reference frame*.

Untuk mentransformasikan sistem dua fasa orthogonal ( $\alpha, \beta$ ) ke sistem dua fasa (d,q), maka secara matematis dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

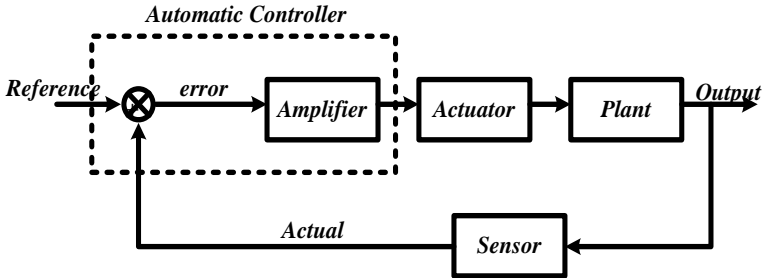
Inverse transformasi park digunakan untuk mentransformasikan balik dari komponen d,q ke komponen  $\alpha, \beta$ , melalui persamaan berikut ini :

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

## 2.7 Kontrol Otomatis

Pengendali PI merupakan suatu pengendali yang mampu memperbaiki tingkat akurasi dari suatu sistem yang memiliki karakteristik umpan balik (*feed back*). Pengendali PI menghitung dan meminimalisasi nilai error antara output dari proses terhadap referensi yang diberikan pada sistem

Cara kerja kontroler otomatis (*automatic controller*) dari Gambar 2.14 adalah memperbaiki respon dari *plant*. Lingkup kerja kontroler otomatis ditunjukkan dengan area yang telah dikotak. *Set point* yaitu nilai keluaran yang diharapkan dari *plant*.



**Gambar 2.14** Sistem kontrol otomatis

Lingkup kerja kontroler otomatis ditunjukkan dengan area yang telah dikotak. *Set point* yaitu nilai keluaran yang diharapkan dari *plant*. *Error detector* berfungsi untuk menjumlahkan nilai *set point* dengan nilai keluaran aktual, sehingga nantinya yang didapat adalah *error* atau nilai penyimpangan. *Amplifier* berisikan nilai konstanta PI yang nantinya digunakan untuk mengubah respon dari *plant*. *Actuator* merupakan *device* tambahan untuk mengatur *plant*. *Plant* merupakan peralatan yang akan diatur dengan memanfaatkan umpan balik yang telah dilewatkan pada bagian-bagian sebelumnya. Sensor digunakan untuk mengubah nilai analog (tekanan, putaran motor, suhu dan lainnya) ke dalam nilai digital agar keluaran sensor dapat dibandingkan dengan nilai *set point*. Pengubahan nilai keluaran sensor harus memiliki satuan yang sama dengan nilai *set point*, jika nilai *set point* berupa tegangan maka nilai keluaran sensor juga harus berupa tegangan.

Kontroler otomatis bekerja dengan membandingkan sinyal referensi (*set point*) dengan sinyal keluaran aktual, sehingga akan didapat nilai *error*. Nilai *error* ini akan diubah menjadi nilai yang sangat kecil dengan mengubah konstanta PI yang terdapat pada bagian *amplifier*.

### 2.7.1 Kontroler Proporsional

Kontroler proporsional berfungsi untuk mengubah respon sistem agar lebih cepat dalam mencapai nilai *steady state* serta memperkecil nilai *error*. Kontroler proporsional bekerja dengan mengalikan nilai penguatan  $K_p$  dengan nilai *error*. Hubungan ini dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$u(t) = K_p \cdot e(t) \quad (2.32)$$

Nilai konstanta proporsional yang akan digunakan memiliki batasan tertentu, tidak dapat dimasukkan secara sembarangan. Jika konstanta penguatan proporsional terlalu tinggi, respon sistem tidak akan mencapai kondisi *steady state*. Sedangkan jika konstanta penguatan proporsional terlalu rendah akan dihasilkan respon sistem yang nilai *steady state* nya jauh dari nilai *set point*. Akibatnya nilai *error* akan menjadi sangat besar.

### 2.7.2 Kontroler Integral

Kontroler integral berfungsi untuk mengurangi *error* pada sistem dengan prinsip pengintegralan. Selain itu juga berfungsi untuk mempercepat waktu dalam menghilangkan *offset* atau mencapai *steady state*. Kontroler integral bekerja dengan mengalikan nilai penguatan  $K_i$  dengan integral dari *error*. Hubungan ini dapat dituliskan sebagai berikut.

$$u(t) = K_i \int_0^t e(t) dt \quad (2.33)$$

Kontroler integral menjamin respon sistem akan menghasilkan nilai *error* yang bernilai nol atau sangat kecil. Namun hal ini tidak dapat terjadi jika sistem hanya memakai kontroler proporsional, karena memiliki cara kerja yang berbeda untuk memperbaiki respon sistem.

## 2.8 Pulse Width Modulation (PWM)

Rangkaian PWM terdiri dari sebuah komparator dengan masukan berupa tegangan referensi DC dan sebuah tegangan *carrier* berupa



sinyal segitiga dengan frekuensi tertentu. Dengan membandingkan kedua masukan tersebut akan didapat keluaran *duty cycle* yang dapat digunakan untuk mengatur tegangan keluaran pada konverter.

Ketika tegangan referensi DC lebih besar dari sinyal carrier maka keluaran komparator adalah  $V_{threshold}$  (on). Sedangkan jika tegangan referensi DC lebih rendah dari tegangan *carrier* maka keluaran komparator adalah 0 (off). *Duty cycle* dihasilkan dari operasi kerja PWM yang ditunjukkan Gambar 2.15. Besar *duty cycle* dapat dihitung melalui persamaan berikut :

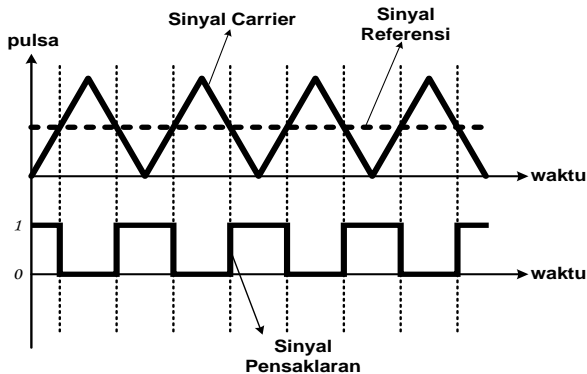
$$D = \frac{t_{on}}{T} \times 100\% \quad (2.34)$$

dimana

$D$  = duty cycle (%)

$t_{on}$  = lama waktu saklar on (detik)

$T$  = periode sinyal gergaji (detik)



**Gambar 2.15** Cara kerja PWM

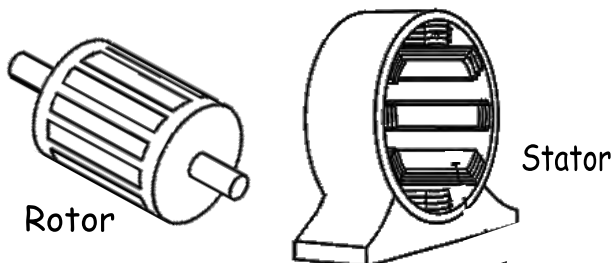
## 2.9 Motor Induksi Tiga Fasa

Motor induksi tiga fasa merupakan motor listrik arus bolak-balik yang banyak digunakan sebagai penggerak mobil listrik. Jika dibandingkan dengan motor DC, motor induksi memiliki kapasitas energi lebih kecil selain itu kecepatan dan percepatan dari motor induksi lebih tinggi. Disebut induksi karena putaran rotor diperoleh melalui induksi dari medan putar yang terbentuk di stator.

Motor induksi tiga fasa berputar dengan kecepatan yang dasarnya konstan, mulai dari keadaan tidak berbeban hingga keadaan beban penuh. Kecepatan putar motor ini dipengaruhi oleh frekuensi, dengan demikian pengaturan kecepatan tidak dapat dengan mudah. Walaupun demikian, motor induksi tiga fasa memiliki beberapa keuntungan, yaitu sederhana, konstruksinya kokoh, harganya relatif murah, mudah dalam melakukan perawatan, dan dapat diproduksi dengan karakteristik yang sesuai dengan kebutuhan.

### 2.9.1 Konstruksi Motor

Sebuah motor induksi tiga fasa memiliki konstruksi yang hampir sama dengan motor listrik jenis lainnya. Motor ini memiliki dua bagian utama, yaitu stator dan rotor. Stator merupakan bagian yang diam dan rotor adalah bagian yang berputar. Ilustrasi dari stator dan rotor dapat dilihat pada Gambar 2.16. Jenis rotor pada motor induksi dibedakan menjadi dua yakni tipe rotor sangkar (*cage rotor*) dan rotor belit (*wound rotor*).



**Gambar 2.16** Penampang stator dan rotor motor induksi[7]

### 2.9.2 Prinsip Kerja

Sumber tegangan tiga fasa disuplai pada kumparan stator, maka akan timbul medan putar dengan kecepatan angular ( $N_s$ ). Besarnya nilai kecepatan angular dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$N_s = \frac{120 \cdot f}{p} \quad (2.35)$$

dimana :

- $N_s$  = kecepatan medan putar stator
- $f$  = frekuensi yang masuk motor
- $p$  = jumlah kutub

Medan putar stator akan memotong batang konduktor pada rotor, sehingga pada kumparan rotor timbul gaya gerak listrik (ggl) induksi sebesar.

$$E_2 = 4,44 f_2 N_2 \varphi_m \quad (2.36)$$

dimana :

$E_2$  = ggl induksi di rotor

$f_2$  = frekuensi di rotor

$N_2$  = jumlah belitan di rotor

$\varphi_m$  = fluks magnetisasi

Ggl induksi yang timbul akan menyebabkan timbulnya arus pada kumparan rotor. Hal ini dikarenakan rangkaian rotor merupakan rangkaian tertutup. Arus stator dan arus rotor akan menimbulkan torsi elektromagnetik pada motor. Jika torsi mula yang dihasilkan cukup besar, rotor akan berputar searah dengan medan putar stator. Tegangan terinduksi timbul akibat adanya perbedaan antara kecepatan angular dari medan putar stator ( $N_s$ ) dengan kecepatan putar rotor ( $N_r$ ). Selisih antara ( $N_s$ ) dan ( $N_r$ ) disebut dengan slip ( $S$ ), dinyatakan dengan :

$$S = \frac{N_s - N_r}{N_s} \times 100\% \quad (2.37)$$

dimana :

$S$  = slip

$N_s$  = kecepatan medan putar stator

$N_r$  = kecepatan putar rotor

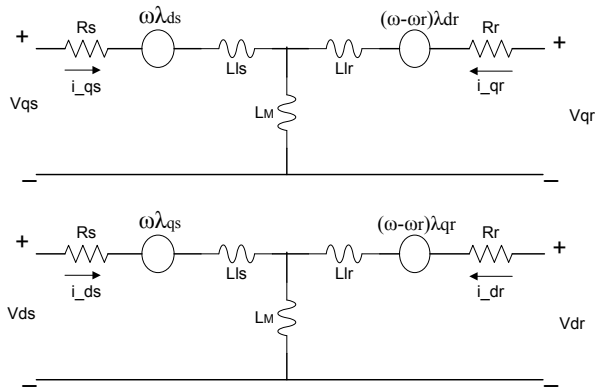
### 2.9.3 Rangkaian Ekuivalen

Analisis rangkaian ekuivalen motor induksi seperti Gambar 2.17 dapat ditinjau dengan menganggap motor induksi sebagai transformator dimana stator merupakan rangkaian primer dan rotor sebagai rangkaian sekunder. Asumsi tegangan sumber adalah sinusoidal dan dalam keadaan *steady state*.

Dalam operasi riil ditemui permasalahan tegangan sumber yang tidak sinusoidal dan ada perubahan beban. Karena itu dibutuhkan pemodelan lain dari motor induksi sehingga analisis terhadap motor induksi dapat dilakukan lebih mudah dan fleksibel. Untuk itu perlu

adanya transformasi koordinat motor induksi dari koordinat tiga fasa (koordinat-abc) menjadi koordinat dua fasa (koordinat-dq).

Keunggulan dari model koordinat-dq yakni mempermudah analisis dan agar diperoleh motor induksi tiga fasa memiliki yang sifat atau perilaku menyerupai motor DC sehingga lebih mudah dikontrol. Analisis tersebut meliputi tegangan stator dan tegangan rotor, fluks stator dan fluks rotor, serta torsi elektromagnetik dari motor induksi.



**Gambar 2.17** Rangkaian ekivalen d-q motor induksi tiga fasa[7]

Berdasarkan Gambar 2.17, persamaan tegangan stator dan rotor motor induksi merupakan fungsi dari arus stator dan arus rotor, serta fungsi dari fluks yang tercakup pada kumparan. Persamaan tegangan stator dan tegangan rotor dinyatakan dengan :

$$\begin{aligned}
 V_{qs} &= R_s \cdot i_{qs} + \omega \lambda_{ds} + \rho \lambda_{qs} \\
 V_{ds} &= R_s \cdot i_{ds} - \omega \lambda_{qs} + \rho \lambda_{ds} \\
 V_{qr} &= R_r \cdot i_{qr} + (\omega - \omega_r) \lambda_{dr} + \rho \lambda_{qr} \\
 V_{dr} &= R_r \cdot i_{dr} - (\omega - \omega_r) \lambda_{qr} + \rho \lambda_{dr}
 \end{aligned} \tag{2.38}$$

Fluks yang tercakup dalam kumparan stator dan rotor didapatkan dari persamaan (2.39).

$$\begin{aligned}
\lambda_{qs} &= L_{ls} \cdot i_{qs} + L_M (i_{qs} + i_{qr}) \\
\lambda_{ds} &= L_{ls} \cdot i_{ds} + L_M (i_{ds} + i_{dr}) \\
\lambda_{qr} &= L_{lr} \cdot i_{qr} + L_M (i_{qs} + i_{qr}) \\
\lambda_{dr} &= L_{lr} \cdot i_{dr} + L_M (i_{ds} + i_{dr})
\end{aligned} \tag{2.39}$$

Persamaan (2.38) dan (2.39) dapat dinyatakan dalam bentuk matriks seperti pada persamaan (2.40).

$$\begin{bmatrix} V_{qs} \\ V_{ds} \\ V_{qr} \\ V_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + \rho L_s & \omega L_s & \rho L_M & \omega L_M \\ -\omega L_s & R_s + \rho L_s & -\omega L_M & \rho L_M \\ \rho L_M & (\omega - \omega_r) L_M & R_r + \rho L_r & (\omega - \omega_r) L_r \\ -(\omega - \omega_r) L_M & \rho L_M & -(\omega - \omega_r) L_r & R_r + \rho L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \end{bmatrix} \tag{2.40}$$

dengan

$$\begin{aligned}
L_s &= L_{ls} + L_M \\
L_r &= L_{lr} + L_M
\end{aligned} \tag{2.41}$$

dimana :

$V_{qs}, V_{ds}$	= tegangan stator pada sumbu dq (V)
$V_{qr}, V_{dr}$	= tegangan rotor pada sumbu dq (V)
$i_{qs}, i_{ds}$	= arus stator pada sumbu dq (A)
$i_{qr}, i_{dr}$	= arus rotor pada sumbu dq (A)
$\lambda_{qs}, \lambda_{ds}$	= fluks stator pada sumbu dq (Wb)
$\lambda_{qr}, \lambda_{dr}$	= fluks rotor pada sumbu dq (Wb)
$R_s$	= tahanan stator (Ohm)
$R_r$	= tahanan rotor (Ohm)
$L_{ls}$	= induktansi diri stator (H)
$L_{lr}$	= induktansi diri rotor (H)
$L_M$	= induktansi mutual (H)

Persamaan torsi yang dihasilkan oleh motor dinyatakan sebagai jumlah dari daya dibandingkan dengan kecepatan mekanik. Nilai torsi motor induksi dapat dinyatakan seperti persamaan (2.42).

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{p}{\omega_r} \left[ \omega (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{dr}) + (\omega - \omega_r) (\lambda_{dr}' i_{qr} - \lambda_{qr}' i_{dr}') \right] \tag{2.42}$$

Persamaan yang menyatakan hubungan antara torsi dengan fluks dapat ditunjukkan melalui persamaan (2.43).

$$\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds} = -(\lambda'_{dr} i'_{qr} - \lambda'_{qr} i'_{dr}) = L_m (i_{dr} i_{qs} - i_{qr} i_{ds}) \quad (2.43)$$

Sehingga torsi dapat dituliskan seperti pada persamaan (2.44).

$$\begin{aligned} T_e &= \frac{3}{2} p L_m (i'_{dr} i'_{qs} - i'_{qr} i'_{ds}) \\ T_e &= \frac{3}{2} p (\lambda'_{qr} i'_{dr} - \lambda'_{dr} i'_{qr}) \\ T_e &= \frac{3}{2} p (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}) \end{aligned} \quad (2.44)$$

Kecepatan putaran motor induksi merupakan fungsi dari torsi elektromagnetik dan torsi beban. Perumusan untuk mendapatkan kecepatan motor induksi adalah sebagai berikut :

$$\frac{J}{P} \frac{d}{dt} \omega_r + B \omega_r = T_e - T_L \quad (2.45)$$

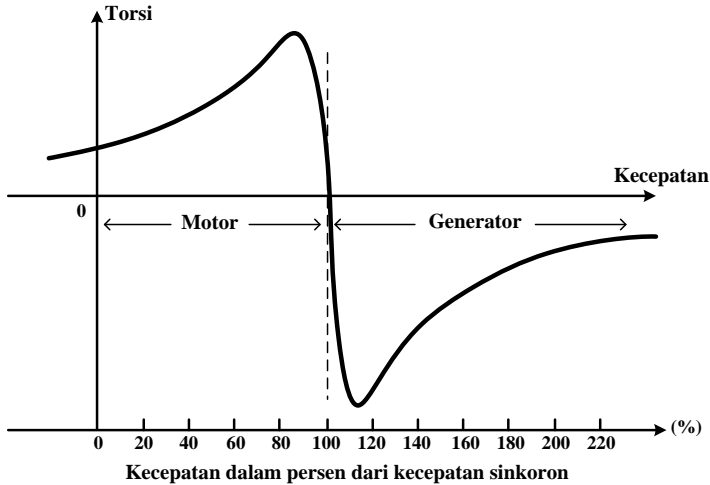
$$\frac{d}{dt} \theta_r = \omega_r \quad (2.46)$$

dimana :

- $T_L$  = torsi beban (N.m)
- $T_e$  = torsi elektromagnetik (N.m)
- $J$  = momen inersia ( $\text{kg.m}^2$ )
- $p$  = jumlah pasang kutub
- $\omega_r$  = kecepatan angular rotor (rad/detik)
- $\theta_r$  = posisi sudut (rad)

## 2.9.4 Pengereman Regeneratif Motor Induksi Tiga Fasa

Motor induksi tiga fasa dapat beroperasi sebagai generator induksi jika kecepatan putar rotor lebih cepat dari kecepatan sinkron pada medan putar stator. Gambar 2.18 adalah kurva karakteristik dari motor induksi. Pada Gambar tersebut dapat dilihat bahwa suatu mesin induksi akan berfungsi sebagai motor induksi ketika slip bernilai positif ( $1 > s > 0$ ). Dan akan menjadi generator induksi ketika slip bernilai negatif ( $0 > s > -1$ ).



**Gambar 2.18** Kurva karakteristik motor induksi

Saat motor induksi regeneratif, motor iduksi akan bertindak sebagai generator induksi. Generator induksi akan menghasilkan tegangan eksitasi ketika terdapat sisa medan pada bagian rotor, jika sisa medan ini tidak ada, maka tegangan induksi juga tidak terbentuk. Maka dari itu, untuk mendapatkan sisa medan di rotor, motor induksi harus beroperasi dulu sebelum menjadi generator induksi. Besar tegangan terinduksi dari generator induksi dipengaruhi oleh kecepatan putar dan juga fluks yang dihasilkan. Fluks ini diperoleh dari sistem eksitasi yang memotong luasan konduktor. Sehingga semakin besar eksitasi maka tegangan terbangkit akan semakin besar.

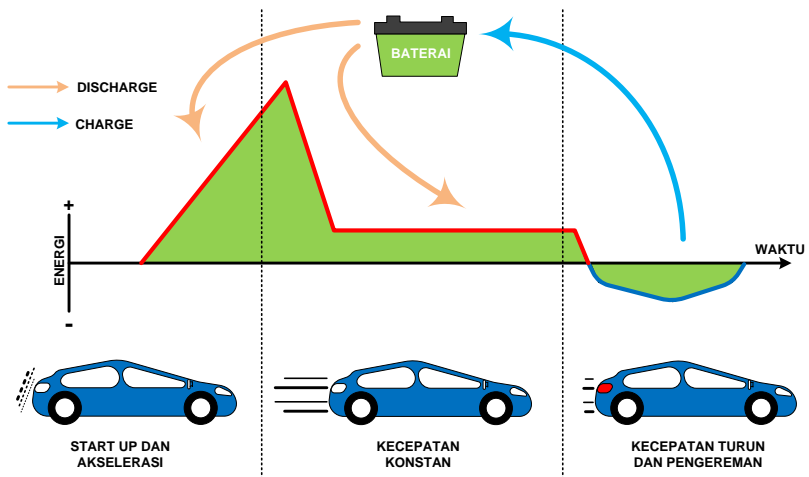
$$e = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (2.47)$$

$$E_a = cn\phi \quad (2.48)$$

dimana :

- $N$  = jumlah belitan
- $n$  = kecepatan putar rotor (rpm)
- $c$  = konstanta mesin
- $\phi$  = fluks (weber)
- $e$  = tegangan jepit (Volt)
- $E_a$  = tegangan tanpa beban (Volt)

Perubahan kecepatan dari motor induksi dapat dilakukan dengan memvariasikan frekuensi tegangan yang masuk ke stator, ditunjukkan dalam persamaan 2.35. Ketika frekuensi yang masuk ke stator tinggi motor akan melaju dengan kecepatan tinggi, namun ketika frekuensi diturunkan maka kecepatan ikut menurun. Perubahan kecepatan turun ini yang disebut kondisi regeneratif. Jadi pengereman regeneratif terjadi jika kecepatan putar rotor lebih cepat dari kecepatan sinkron yang ditetapkan dalam frekuensi tertentu. Selama putaran rotor lebih cepat dari kecepatan sinkronnya, motor dalam pengaruh torsi negatif sehingga motor induksi yang semula sebagai beban, pada keadaan regeneratif motor induksi berperan sebagai generator induksi yang menghasilkan daya. Keadaan regeneratif ini dapat diilustrasikan dari Gambar 2.19.



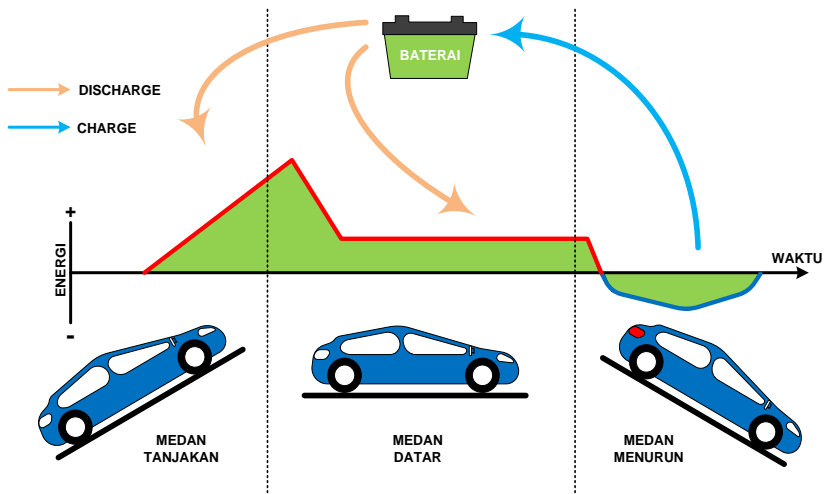
**Gambar 2.19** Regeneratif pada kecepatan yang bervariasi

Pada keadaan start up dan akselerasi mobil membutuhkan daya yang besar karena motor memiliki torsi awal yang besar pula. Ketika kecepatan konstan tercapai, daya yang dibutuhkan menjadi lebih kecil. Kondisi regeneratif terjadi pada kecepatan yang turun dan pengereman. Untuk kondisi ini, terjadi perpindahan aliran daya dari motor menuju baterai.

Kondisi lain dari pengereman regeneratif yakni diperoleh melalui medan yang menurun. Pada jalan menurun, motor mendapat



gaya dorong mekanik, sehingga seolah-olah mendapatkan torsi negatif, torsi negatif ini memaksa motor untuk berputar melebihi kecepatan sinkron motor. Dengan demikian terjadi regenerasi energi dari motor yang dapat disimpan kembali ke baterai. Gambar 2.20 menganalogikan mobil yang melaju pada lintasan yang berbeda. Pada medan tanjakan mobil mendapatkan torsi tambahan yang lebih besar yang memaksa mobil menambah daya dari baterai. Pada lintasan datar mobil memikul torsi yang tidak terlalu besar sehingga daya yang dibutuhkan lebih kecil. Pada medan yang menurun merupakan kondisi regeneratif dimana adanya torsi negatif yang membantu motor berputar melebihi kecepatan sinkronnya sehingga aliran daya bergerak dari motor menuju baterai.



**Gambar 2.20** Regeneratif pada kondisi lintasan yang bervariasi

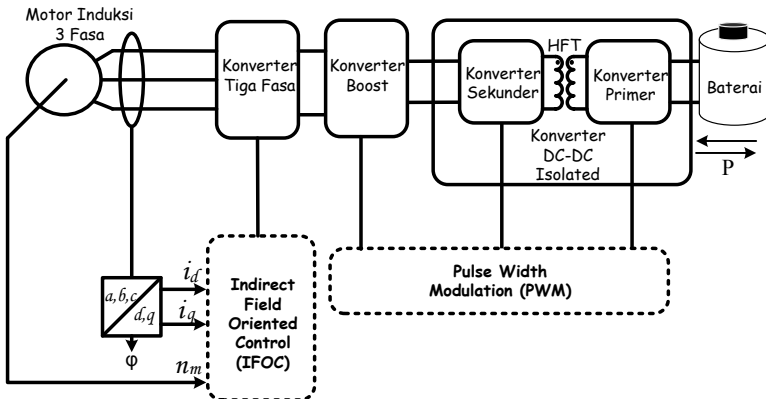
# BAB III

## PEMODELAN KONVERTER AC-DC-DC *ISOLATED* UNTUK Pengereman Regeneratif MOTOR INDUKSI TIGA FASA

### 3.1 Skema Konverter AC-DC-DC *Isolated*

Penelitian mengenai pengereman regeneratif perlu dikembangkan karena pengereman ini dapat menekan konsumsi energi listrik pada kendaraan listrik. Pengereman regeneratif memanfaatkan gerak kinetik motor menjadi energi listrik yang dapat disimpan ke baterai. Pengereman regeneratif perlu rangkaian elektronika daya yang dapat bekerja aliran daya dua arah (*bidirectional*). Rangkaian elektronika daya *bidirectional* yang ada saat ini umumnya rangkaian tertutup (*non-isolated*). Artinya dari sisi masukan hingga sisi keluaran rangkaian tidak memiliki isolasi atau sekat pemisah. Dari sisi biaya rangkaian *non-isolated* lebih ekonomis, namun jika terjadi gangguan disalah satu sisi sulit untuk diproteksi sehingga kerap kali mengganggu sisi lainnya.

Untuk itu diperlukan rangkaian pemisah antara sisi masukan dan keluaran. Tujuannya adalah jika terjadi gangguan disalah satu sisi, maka gangguan tersebut dapat direduksi sehingga tidak mengganggu sisi yang lainnya. Gambar 3.1 merupakan rangkaian AC-DC-DC *isolated* yang menggunakan konsep *bidirectional*.



**Gambar 3.1** Skema konverter AC-DC-DC *isolated*

Rangkaian AC-DC-DC *isolated* dapat bekerja pada mode motor akselerasi dan motor regeneratif. Jika motor akselerasi, motor membutuhkan daya dari baterai, maka aliran daya bergerak dari baterai menuju motor. Selanjutnya ketika motor regeneratif, motor akan beroperasi sebagai generator induksi artinya motor dapat menyuplai daya, kemudian daya dari motor bergerak menuju baterai, disinilah baterai melakukan pengisian (*charging*).

Desain dan simulasi konverter AC-DC-DC *isolated* pada penelitian ini terdiri dari baterai sebagai sumber energi, konverter DC-DC *isolated*, konverter boost, konverter tiga fasa yang dikontrol oleh *Indirect Field Oriented Control* (IFOC) dan motor induksi tiga fasa sebagai penggerak.

Pada penelitian ini, digunakan dua metode untuk memperoleh kondisi regeneratif yakni variasi kecepatan referensi dan variasi torsi beban pada motor induksi tiga fasa.

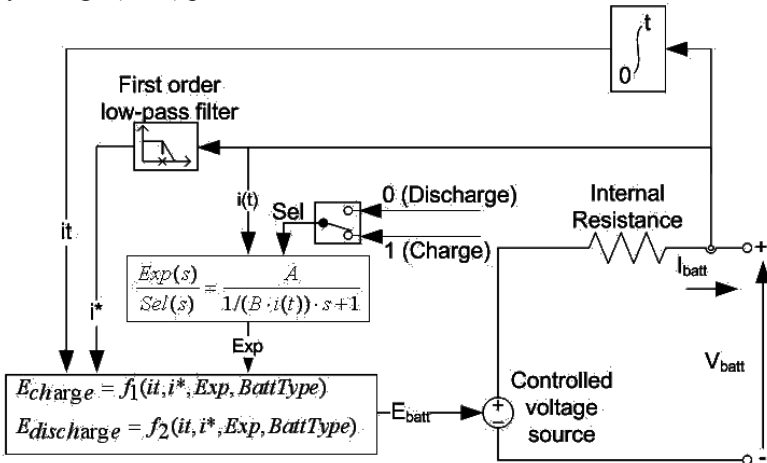
### 3.2 Pemodelan Baterai Lithium Ion

Baterai lithium ion yang digunakan pada tugas akhir ini mengacu pada baterai merk “Ion Battery Pack Art. Nr. 40290231” produksi Whisper Power yang berlokasi di Belanda. Tegangan baterai 48 V dan kapasitas 100 Ah dipasang seri terdiri dari 2 baterai sehingga didapat tegangan baterai 96 V 100 Ah. Parameter baterai yang diambil dari *datasheet* baterai ditunjukkan oleh Tabel 3.1.

**Tabel 3.1** Parameter baterai “Ion Battery Pack Art. Nr. 40290231”

Parameter	Nilai
Tegangan Nominal	4.81 V
Kapasitas Nominal	100 Ah
Daya Nominal	4.8 kWh
Tegangan <i>Charge Cut-off</i>	$\leq 57.6$ V
Tegangan <i>Discharge Cut-off</i>	$\geq 44.8$
Arus <i>Charge</i>	$\leq 0.5$ C
Arus Kerja	0.5 C
Arus <i>Discharge</i> Maksimum	1 C
Estimasi Berat	56 kg
Konfigurasi Baterai	2 stack masing-masing 8 sel

Selanjutnya parameter baterai akan dikonversi ke perangkat lunak MATLAB untuk diperoleh parameter-parameter dari pemodelan baterai lithium ion. Pemodelan baterai lithium ion terdapat pada modul SIMULINK. Baterai dimodelkan dengan menggunakan *controlled voltage source* yang dikontrol menggunakan persamaan yang telah ditetapkan oleh modul SIMULINK. Sehingga pemodelan baterai lithium ion sesuai dengan yang diinginkan. Gambar 3.2 merupakan rangkaian ekivalen baterai pada modul SIMULINK yang merepresentasikan *State Of Charge* (SOC) pada baterai.



**Gambar 3.2** Rangkaian ekivalen baterai pada modul SIMULINK

SOC berfungsi mendefinisikan kondisi awal dari pemakaian baterai. Satuan pemakaian SOC dalam persen, 100% menandakan baterai tersebut dalam kondisi penuh dan 0% menandakan baterai tersebut dalam kondisi kosong. Untuk menghitung SOC dari baterai dapat digunakan persamaan (3.1).

$$SOC = 100 \left( 1 - \frac{Q(1.05)}{\int idt} \right) \quad (3.1)$$

dimana :

- $SOC$  = *State Of Charge* baterai (%)
- 100 = kondisi awal baterai, 100 (terisi penuh) dan 0 (kosong)
- $Q$  = kapasitas baterai (Ah)
- $i$  = arus baterai (A)

Pada baterai lithium keadaan pengisian (*charge*) dan *discharge* dapat dirumuskan pada persamaan (3.2) dan (3.3)

1. Keadaan *Charge* ( $i^* > 0$ )

$$f_1(it, i^*, i) = E_o - K \cdot \frac{Q}{0,1 \cdot Q + it} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q + it} \cdot it + A \cdot \exp\left[\frac{Q}{Q + it} - B \cdot it\right] \quad (3.2)$$

2. Keadaan *Discharge* ( $i^* < 0$ )

$$f_2(it, i^*, i) = E_o - K \cdot \frac{Q}{Q + it} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q + it} \cdot it + A \cdot \exp\left[\frac{Q}{Q + it} - B \cdot it\right] \quad (3.3)$$

dimana :

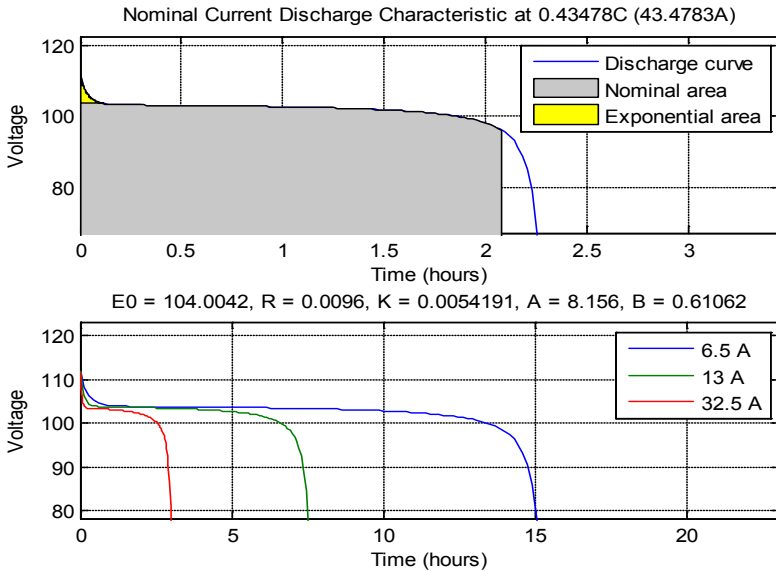
- $E_o$  = tegangan konstan (V)
- $Exp(s)$  = daerah eksponensial dinamik (V)
- $K$  = konstanta polarisasi ( $Ah^{-1}$ ) atau Resistansi polarisasi (Ohms)
- $i^*$  = arus frekuensi rendah (A)
- $i$  = arus baterai (A)
- $it$  = kapasitas yang diekstraksi (Ah)
- $Q$  = kapasitas maksimum baterai (Ah)
- $A$  = eksponensial tegangan (V)
- $B$  = eksponensial kapasitas ( $Ah$ )<sup>-1</sup>

Tabel 3.2 menunjukkan parameter-parameter dari batrai lithium ion tegangan 96 V dan kapasitas 100 Ah yang ditampilkan oleh modul SIMULINK pada perangkat lunak MATLAB.

**Tabel 3.2** Parameter Baterai pada modul SIMULINK

Parameter	Nilai
<i>Nominal Voltage</i>	96 V
<i>Rated Capacity</i>	100 Ah
<i>Initial State-Of-Charge</i>	93 %
<i>Full Charge Voltage</i>	111.75 V
<i>Nominal Discharge Current</i>	43.48 A
<i>Internal Resistance</i>	0.0096 Ω
<i>Capacity @Nominal Voltage</i>	90.44 Ah
<i>Exponential Zone</i>	[103.72 V ; 4.92 Ah]

Pada penelitian ini digunakan baterai lithium ion dengan tegangan 96 V 100 Ah. Setelah dikonversi ke perangkat lunak MATLAB R2010A, pada modul SIMULINK akan diperoleh karakteristik baterai (Gambar 3.5) dan parameter baterai lithium ion untuk pemodelan dalam PSIM 9.0.



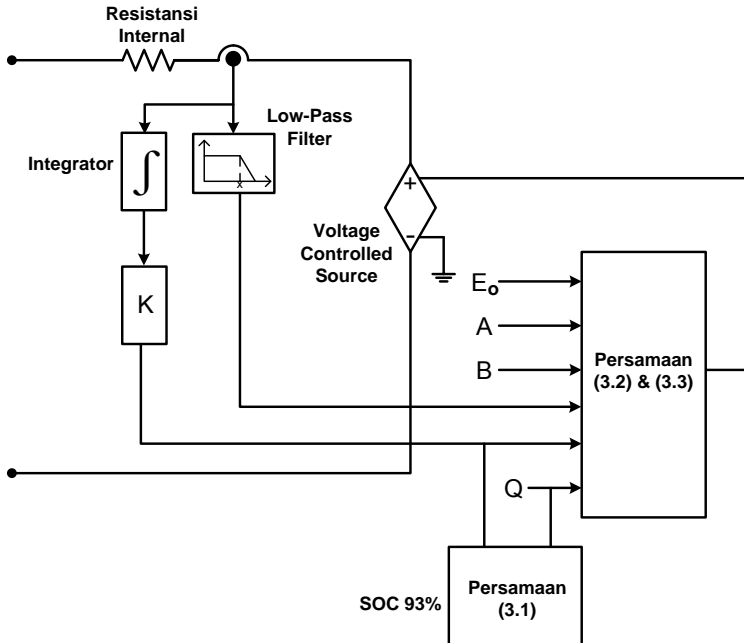
**Gambar 3.3** Karakteristik baterai lithium ion yang diperoleh

Pada pengujian diambil keadaan baterai dalam keadaan 93 %. Jadi harus diperhatikan nilai arus yang sudah diserap atau *Initial Output Value*. Berikut adalah perhitungan untuk mencari nilai *Initial Output Value* :

$$\begin{aligned}
 \text{Initial Output Value} &= \frac{(100 - \text{SOC})}{100} \times \text{Capacity(Ah)} \times 3600 & (3.4) \\
 &= \frac{(100 - 93)}{100} \times 100 \times 3600 \\
 &= 25200
 \end{aligned}$$

Seluruh parameter baterai yang telah dikonversi ke dalam program MATLAB pada Gambar 3.12 menghasilkan parameter  $E_0$ ,  $R$ ,  $A$ ,  $Q$ ,  $K$  dan  $B$ . Parameter inilah yang dimasukkan ke dalam pemodelan

baterai pada PSIM. Pemodelan Baterai pada PSIM ditunjukkan oleh Gambar 3.4.



**Gambar 3.4** Pemodelan baterai pada PSIM

### 3.3 Konverter DC-DC *Isolated*

Konverter DC-DC *isolated* bertugas menyalurkan daya dari baterai ke motor ataupun sebaliknya. Konverter DC-DC *isolated* terdiri dari konverter primer, HFT, dan konverter sekunder. Komponen-komponen tersebut memiliki tugas masing-masing tergantung aliran dayanya.

#### 3.3.1 Analisis Kondisi Akselerasi

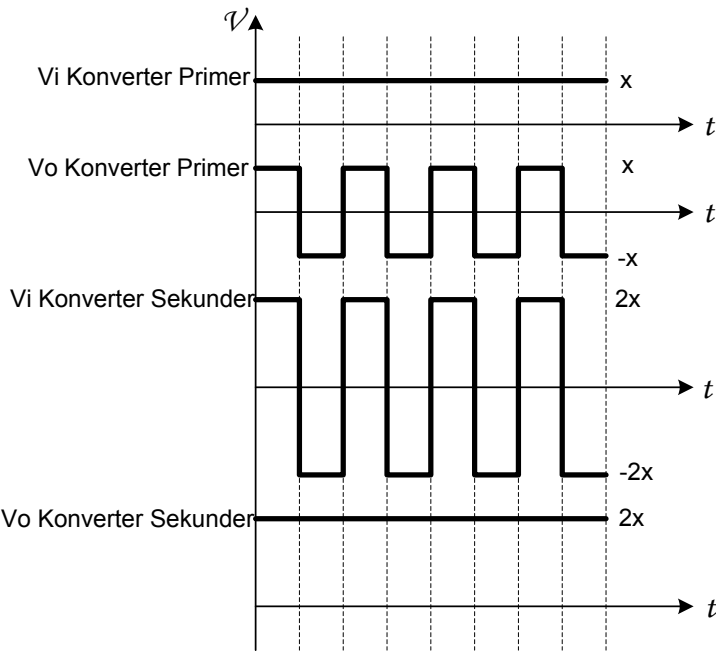
Ketika kondisi akselerasi, daya bergerak dari baterai menuju motor induksi tiga fasa. Konverter sekunder berfungsi sebagai inverter yang merubah tegangan DC baterai menjadi tegangan persegi, HFT berfungsi sebagai trafo *step up* yang meningkatkan nilai tegangan dua kali lebih besar dan Konverter primer menjadikan tegangan persegi

output dari HFT menjadi tegangan DC. Mode pensaklaran dari konverter primer dan konverter sekunder untuk mode akselerasi dapat dilihat pada Tabel 3.3.

**Tabel 3.3** Mode pensaklaran pada kondisi akselerasi

State	Konv. Prim	Konv. Sek	$V_o$ Konv. Prim	$V_o$ Konv. Sek
State 1	$S_1$ & $S_4$ on	$D_6$ & $D_7$	$V_{baterai}$	$2 V_{baterai}$
State 2	$S_2$ & $S_3$ on	$D_5$ & $D_8$	$-V_{baterai}$	$-2 V_{baterai}$

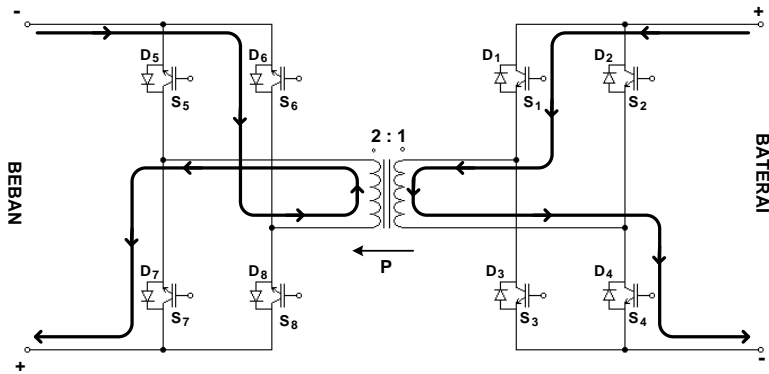
Gambar 3.5 menunjukkan kombinasi grafik tegangan dari pensklaran konverter DC-DC *isolated* untuk kondisi akselerasi.



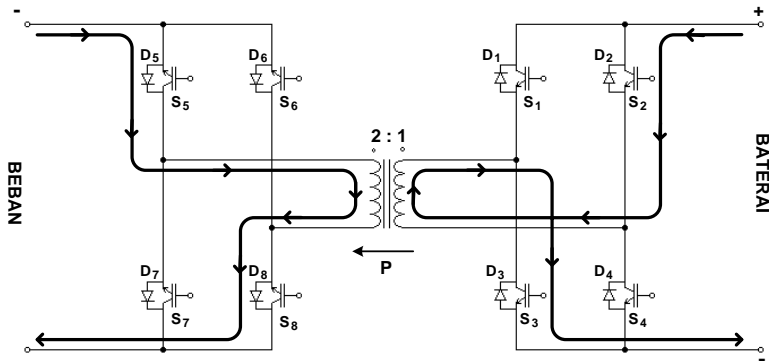
**Gambar 3.5** Kombinasi tegangan konverter DC-DC *isolated* kondisi akselerasi

Analisis aliran daya yang terjadi pada konverter DC-DC *isolated* untuk mode akselerasi dapat dilihat pada Gambar 3.6 (a) untuk state 1 dan Gambar 3.6 (b) untuk state 2.





(a)



(b)

**Gambar 3.6** Aliran daya pada kondisi akselerasi (a) State 1 (b) State 2

Berikut analisis matematis dari konverter DC-DC *isolated* untuk kondisi akselerasi. Adapun parameter yang telah diketahui adalah :

1. Tegangan baterai DC 96 V
2. HFT yang digunakan pada simulasi adalah trafo ideal
3. Perbandingan belitan primer dan sekunder HFT adalah 1:2
4. Frekuensi pensaklaran konverter DC-DC *isolated* 100 Hz

Dengan tegangan masukan 96 V dan perbandingan belitan trafo 1:2 maka tegangan keluaran dapat ditentukan melalui persamaan (2.14)

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p}{N_s} \Rightarrow \frac{96 \text{ V}}{V_s} = \frac{1}{2} \Rightarrow V_s = 192 \text{ V}$$

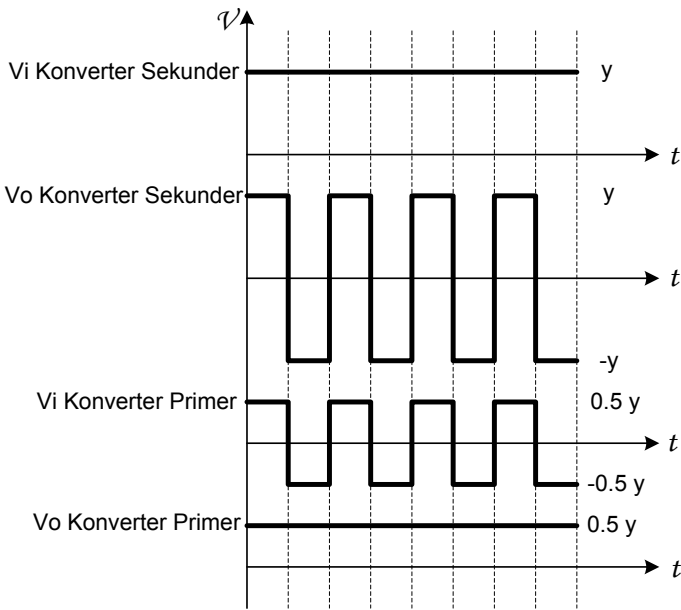
### 3.3.2 Analisis Kondisi Regeneratif

Sebaliknya ketika keadaan regeneratif, daya bergerak dari baterai menuju motor. Konverter primer berfungsi sebagai inverter yang merubah tegangan DC pada DC-bus menjadi tegangan persegi. HFT berfungsi sebagai trafo *step down* yang menurunkan nilai tegangan setengah kali dari tegangan DC-bus. Konverter sekunder berfungsi rectifier yang menyearahkan tegangan persegi output dari HFT menjadi tegangan DC. Mode pensaklaran dari konverter primer dan konverter sekunder untuk mode regeneratif dapat dilihat pada Tabel 3.4.

**Tabel 3.4** Mode pensaklaran pada kondisi regeneratif

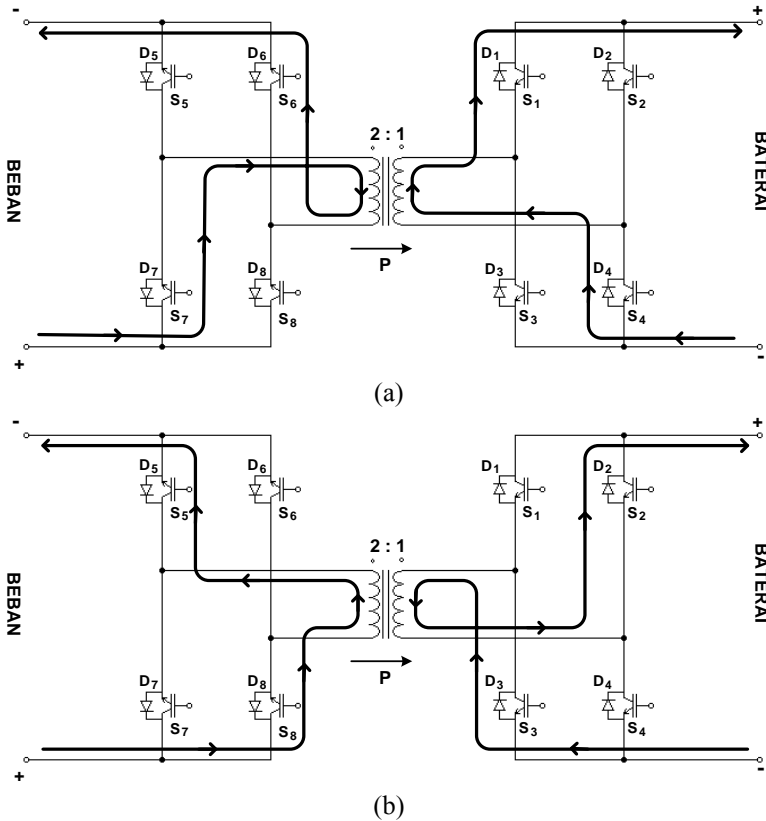
State	Konv. Sek	Konv. Prim	$V_o$ Konv. Sek	$V_o$ Konv. Prim
State 1	$S_6$ & $S_7$ on	$D_1$ & $D_4$	$V_{DC-bus}$	$0.5 V_{DC-bus}$
State 2	$S_5$ & $S_8$ on	$D_2$ & $D_3$	$-V_{DC-bus}$	$-0.5 V_{DC-bus}$

Gambar 3.7 menunjukkan kombinasi grafik tegangan dari pensaklaran konverter DC-DC *isolated* untuk kondisi regeneratif.



**Gambar 3.7** Kombinasi tegangan konverter DC-DC *isolated* kondisi regeneratif

Analisis aliran daya yang terjadi pada konverter DC-DC *isolated* untuk kondisi regeneratif dapat dilihat pada Gambar 3.8 (a) untuk state 1 dan (b) untuk state 2.

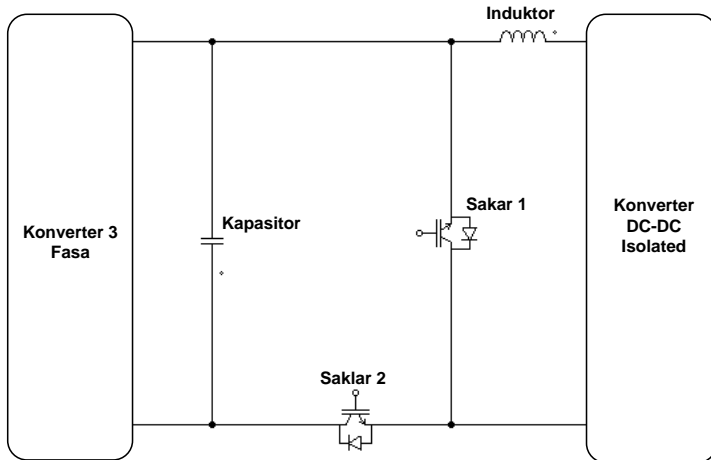


**Gambar 3.8** Aliran daya pada kondisi regeneratif (a) State 1 (b) State 2

### 3.4 Analisis Mode Boost

Pada konverter AC-DC-DC *isolated* yang diusulkan ini, konverter boost terletak diantara konverter DC-DC *isolated* dan Konverter tiga fasa. Konverter boost ini berfungsi menaikkan tegangan konverter DC-DC *isolated* menjadi tegangan DC yang lebih tinggi sebelum masuk inverter tiga fasa. Konverter boost pada Gambar 3.9 terdiri dari induktor,

kapasitor dan dua buah saklar. Saklar pertama berfungsi sebagai penskaran atau penentu *duty cycle*. Sedangkan saklar yang kedua merupakan saklar bantuan yang beroperasi ketika kondisi regeneratif dan padam pada kondisi akselerasi.



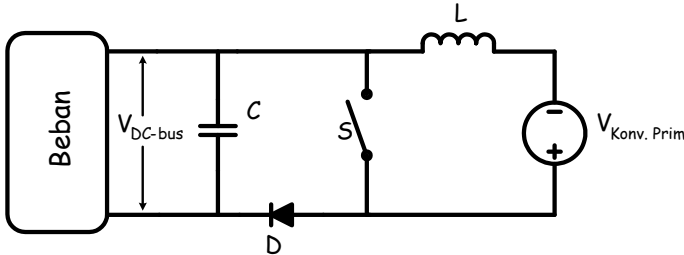
**Gambar 3.9** Konverter boost

Konverter boost hanya aktif pada kondisi akselerasi artinya saklar 1 akan konduksi sesuai *duty cycle* yang diinginkan, saklar 2 selalu padam sehingga ketika saklar 1 berada pada siklus padam aliran arus akan *forward bias* melewati dioda saklar 2. Sedangkan untuk kondisi regeneratif saklar 1 akan selalu padam dan saklar 2 selalu konduksi. Berikut akan dibahas analisis dari konverter boost yang beroperasi pada kondisi akselerasi. Adapun parameter yang telah diketahui adalah :

1. Tegangan keluaran konverter DC-DC *isolated* 192 V (masukan konverter boost)
2. Tegangan DC bus 590 V (keluaran konverter boost)
3. Frekuensi pensaklaran konverter boost 100 kHz
4. Riak arus  $\pm 10\%$
5. Riak tegangan  $\pm 10\%$

Dari Gambar 3.9, rangkaian konverter boost dapat dibuat sederhana untuk mempermudah analisis. Rangkaian ekuivalen dari konverter boost direpresentasikan pada Gambar 3.10. induktor (L) pada rangkaian berfungsi sebagai media penyimpanan arus sekaligus mereduksi

riak arus dan kapasitor (C) berfungsi sebagai media penyimpan tegangan sekaligus mereduksi riak tegangan.



**Gambar 3.10** Rangkaian ekivalen konverter boost

Analisis matematis dari konverter boost pada konverter AC-DC-DC *isolated* yang diusulkan ini sebagai berikut. Untuk menentukan *duty cycle* dapat menggunakan persamaan (2.26)

$$V_o = \frac{V_i}{(1-D)}$$

$$V_{DC-bus} = \frac{V_{konv\ prim}}{(1-D)}$$

$$590 = \frac{192}{(1-D)} \Rightarrow D = 0.675$$

Menghitung nilai induktur menggunakan persamaan (2.28)

$$L = \frac{V_i \times D}{\Delta I_L \times f_s} = 2.592 \text{ mH}$$

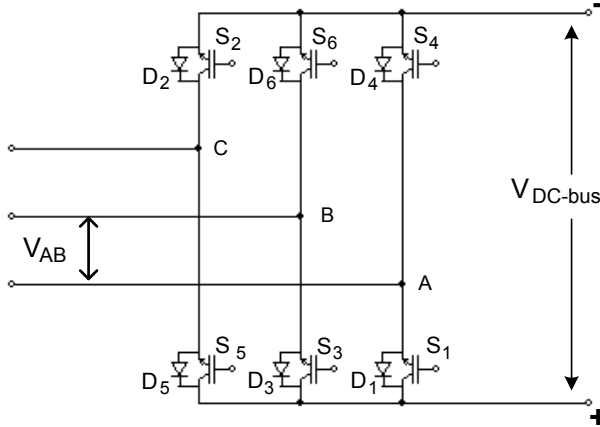
Menghitung nilai kapasitor menggunakan persamaan (2.29)

$$C = \frac{D}{R \times \left(\frac{\Delta V_o}{V_o}\right) \times f_s} = 6.75 \text{ uF}$$

### 3.5 Konverter Tiga Fasa

Konverter tiga fasa pada topologi yang diusulkan ini merupakan rangkaian inverter sekaligus penyearah tiga fasa. Rangkaian konverter tiga fasa pada Gambar 3.11 terdiri dari enam saklar berupa IGBT yang bersifat ideal yang diparalel dengan dioda *free wheeling*. Enam IGBT tersebut akan dikontrol dengan metode *Indirect Field Oriented Control*

(IFOC) sehingga dapat dihasilkan gelombang sinus tiga fasa yang masuk ke motor induksi tiga fasa.



**Gambar 3.11** Rangkaian konverter tiga fasa

Untuk mendapatkan tegangan keluaran AC sesuai *rating* motor maka tegangan masukan di DC-bus perlu diperhitungkan. Pada keadaan akselerasi digunakan tegangan DC-bus 590 V sedangkan pada keadaan regeneratif digunakan tegangan DC-bus sedikit lebih besar dari 192 V yang berfungsi untuk *charging* baterai dengan konstan tegangan.

$$V_{RMS\ l-l} = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{4 \cdot V_{DC}}{n\pi\sqrt{2}} \cos\left(\frac{n\pi}{6}\right) \quad (3.5)$$

dimana:

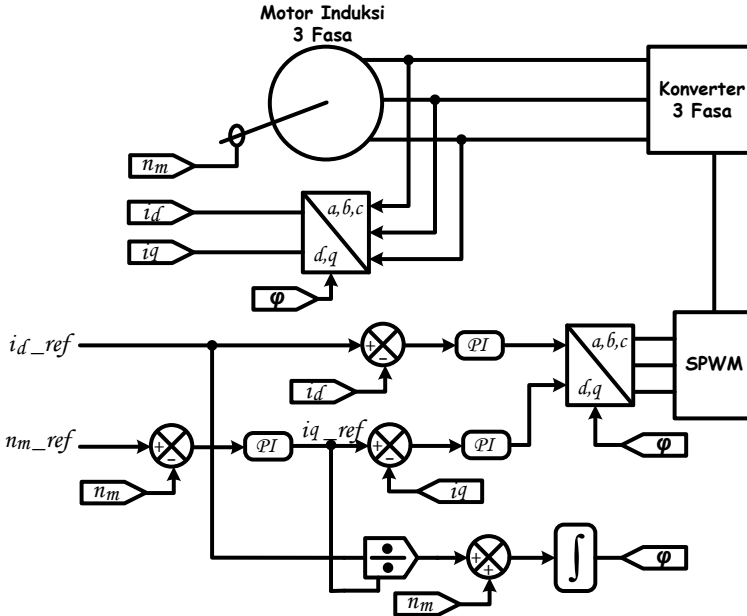
- $V_{RMS\ l-l}$  = tegangan *line-line* rms keluaran konverter 3 fasa (V)
- $V_{DC}$  = tegangan masukan dari DC-bus (V)
- $n$  = orde harmonisa

Untuk keadaan akselerasi tegangan DC-bus yang digunakan adalah 590 V, dan jika disubstitusikan ke persamaan 3.5 maka diperoleh tegangan *line-line* yang besarnya 380 V.

$$V_{AB} = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{4 \cdot V_{DC-bus}}{n\pi\sqrt{2}} \cos\left(\frac{n\pi}{6}\right) = 379.96\ V \approx 380\ V$$

### 3.6 Indirect Field Oriented Control (IFOC)

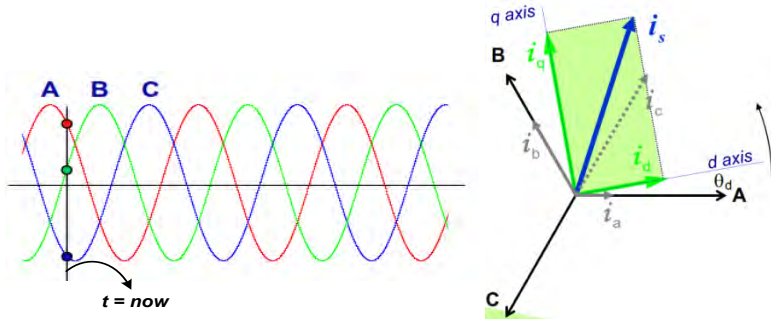
Skema Pengaturan kecepatan motor induksi pada penelitian ini menggunakan default model pada modul FOC yang tersedia pada perangkat lunak. Skema rangkaian pengaturan motor induksi dengan FOC ditunjukkan pada Gambar 3.12.



**Gambar 3.12** Skema rangkaian IFOC

IFOC digunakan sebagai sinyal referensi kontrol *Sinusoidal Pulse Width Modulation* (SPWM) yang akan mengatur pensaklaran IGBT konverter tiga fasa pada kondisi akselerasi. Pada IFOC terdapat dua referensi yang menjadi acuan, yaitu referensi kecepatan dalam bidang q ( $i_{q\_ref}$ ) dan referensi arus dalam bidang d ( $i_{d\_ref}$ ). Pada IFOC besarnya  $i_{d\_ref}$  adalah 3 A. Gambar 3.13 menjelaskan, dengan asumsi magnitude dari masing masing arus tiga fasa adalah sama besarnya sehingga diperoleh :

$$-i_c = i_a + i_b \quad (3.6)$$



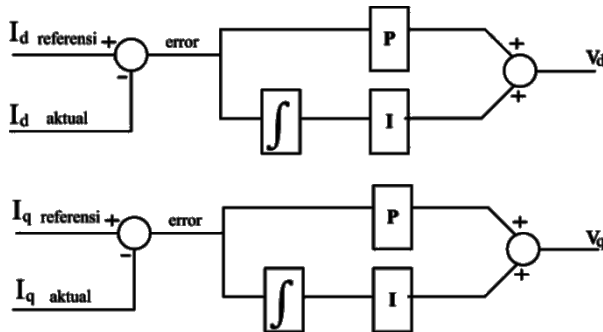
**Gambar 3.13** (a) arus tiga fasa, (b) vektor arus koordinat d-q

Penentuan  $i_d$  dan  $i_q$ . Arus  $i_d$  dan  $i_q$  diperoleh melalui sensor arus dari masing-masing lengan tiga fasa. Arus  $i_d$  dan  $i_q$  menggunakan transformasi forward Clark-Park sebagai berikut.

$$i_d = \sqrt{\frac{2}{3}} \times \left( \cos \theta \times i_a + \cos \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) \times i_b + \cos \left( \theta - \frac{4\pi}{3} \right) \times i_c \right) \quad (3.7)$$

$$i_q = \sqrt{\frac{2}{3}} \times \left( -\sin \theta \times i_a - \sin \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) \times i_b - \sin \left( \theta - \frac{4\pi}{3} \right) \times i_c \right) \quad (3.8)$$

Model transformasinya seperti ditunjukkan pada Gambar 3.14



**Gambar 3.14** Model transformasi Park

Setelah menjadi model dua fasa, selanjutnya dikembalikan ke dalam bentuk tiga fasa sebagai referensi sinyal SPWM untuk mengatur pensaklaran pada konverter tiga fasa.



$$V_1 = \sqrt{\frac{2}{3}} \times (\cos(\theta) \times V_d - \sin(\theta) \times V_q) \quad (3.9)$$

$$V_2 = \sqrt{\frac{2}{3}} \times \left( \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \times V_d - \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \times V_q \right) \quad (3.10)$$

$$V_3 = \sqrt{\frac{2}{3}} \times \left( \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \times V_d - \sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \times V_q \right) \quad (3.11)$$

### 3.7 Pemodelan Motor Induksi Tiga Fasa

Topologi yang diusulkan ini menggunakan motor induksi tiga fasa rotor sangkar. Tabel 3.5 adalah parameter dari motor induksi tiga fasa yang akan disimulasikan.

**Tabel 3.5** Parameter motor induksi tiga fasa yang digunakan

Parameter	Nilai
Daya Motor ( $P_o$ )	7,5 kW (10 HP)
Kecepatan ( $N_r$ )	1190 RPM
Torsi ( $\tau$ )	55 Nm
Tegangan ( $V_{LN} / V_{LL}$ )	220/380 V
Frekuensi ( $f$ )	60 Hz
Resistansi Stator ( $R_s$ )	0,294 $\Omega$
Induktansi Stator ( $L_s$ )	1,39 mH
Resistansi Rotor ( $R_r$ )	0,156 $\Omega$
Induktansi Rotor ( $L_r$ )	0,74 mH
Induktansi Magnetisasi ( $L_m$ )	41 mH
Momen Inersia	0,03 kg.m <sup>2</sup>
Jumlah Kutub	6

### 3.8 Pengujian Regeneratif

Pada penelitian yang diusulkan ini, pengujian untuk memperoleh pengereman regeneratif dilakukan dengan dua cara yakni pengujian dengan kecepatan bervariasi dan pengujian dengan torsi beban bervariasi. Kecepatan yang digunakan dalam satuan km/jam sehingga perlu adanya konversi dari rpm ke km/jam. Adapun parameter yang diketahui adalah :

1. Diameter ( $d$ ) roda mobil 0.5 m
2. Rasio gear 1 : 1
3. Kecepatan yang digunakan adalah 70 km/jam, 40 km/jam, 30 km/jam, dan 0 km/jam

Keliling roda ( $k$ ) dapat ditentukan melalui persamaan 3.12 dan kecepatan ( $v$ ) ditentukan dari persamaan 3.13.

$$k = \pi \times d \quad (3.12)$$

$$k = \frac{22}{7} \times 0.5 = 1.57 \text{ m}^2$$

$$v = k \times rpm \times rasio \text{ gear} \quad (3.13)$$

Untuk kecepatan 70 km/jam

$$70 \times 1000 = 1.57 \times rpm \times 1 \times 60$$

$$rpm = 743.1$$

Untuk kecepatan 40 km/jam

$$40 \times 1000 = 1.57 \times rpm \times 1 \times 60$$

$$rpm = 424.6$$

Untuk kecepatan 30 km/jam

$$30 \times 1000 = 1.57 \times rpm \times 1 \times 60$$

$$rpm = 318.5$$

Dari persamaan diatas dapat menentukan estimasi jarak tempuh dari mobil listrik berdasarkan kapasitas baterai yang digunakan. Berikut adalah penjelasannya.

Tegangan di DC-bus adalah 590 V dengan menarik arus sebesar 5 A. Pada kecepatan 40 km/jam, Wh/km yang digunakan adalah:

$$\text{Volt} \times \frac{\text{Ampere}}{\text{km/jam}} \quad (3.17)$$

$$590 \text{ V} \times \frac{5 \text{ Amp}}{40 \text{ km/jam}} = 73.75 \text{ Wh/km}$$

Dengan kapasitas baterai sebesar 96 V 100 Ah = 9600 Wh dan *Deep of Discharge* 15% jadi kapasitas baterai yang dapat digunakan adalah 8160 Wh. Jarak yang mampu ditempuh oleh kendaraan listrik dengan 1 *cycle* pengisian baterai kecepatan 40 km/jam sebesar:

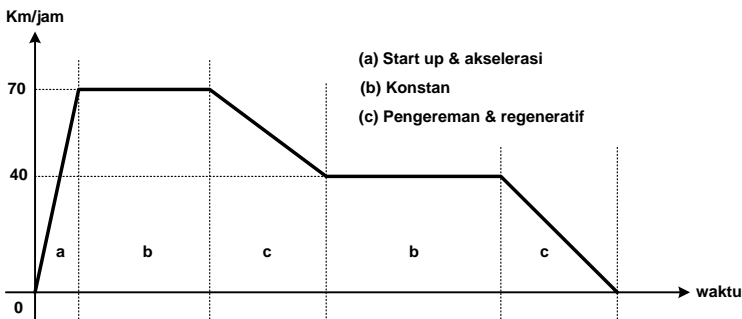
$$\frac{\text{Watt hour}}{\text{Wh/km}} \quad (3.18)$$

$$\frac{8160 \text{ Wh}}{73.75 \text{ Wh/km}} = 110.64 \text{ km}$$

Jadi estimasi jarak yang mampu ditempuh mobil dengan kecepatan 40km/jam adalah 110.64 km.

### 3.8.1 Pengujian dengan Kecepatan Bervariasi

Kecepatan naik dan konstan, kondisi mobil akselerasi. Sedangkan kecepatan turun kondisi mobil regeneratif. Hal ini dapat dianalogikan mobil sedang melaju pada kecepatan tertentu kemudian melakukan pengereman dengan cara mengurangi tekanan pedal gas atau menginjak pedal rem. Adapun dinamika pergerakan mobil yang diujikan adalah dari keadaan diam 0 km/jam melaju kecepatan 70 km/jam, konstan 70 km/jam, kecepatan turun ke 40 km/jam, konstan 40 km/jam, kemudian berhenti 0 km/jam dan torsi beban yang diberikan konstan 3 Nm. Gambar 3.15 adalah plot grafik dari variasi kecepatan yang diujikan.



**Gambar 3.15** Grafik variasi kecepatan yang diujikan

### 3.8.2 Pengujian dengan Torsi Beban Bervariasai

Lintasan tanjakan dan datar, kondisi mobil akselerasi. Sedangkan lintasan yang menurun kondisi mobil regeneratif. Lintasan yang menanjak menjadikan mobil bertambah bebannya sehingga seolah-olah motor mendapatkan torsi positif yang lebih besar. Lintasan menurun menjadikan mobil mendapat gaya dorong sehingga seolah-olah motor mendapatkan torsi negatif yang menambah kecepatan putar rotor. Pada penelitian ini kecepatan yang digunakan adalah konstan 30 km/jam. Torsi beban bervariasi dari 10 Nm konstan, -7 Nm konstan, 5 Nm konstan, -4 Nm konstan dan inersia dari torsi beban adalah 0.01 Nm.

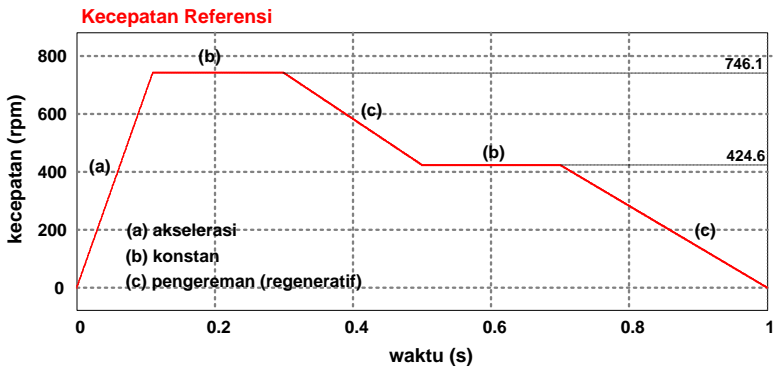
## BAB IV

### HASIL SIMULASI DAN ANALISIS DATA

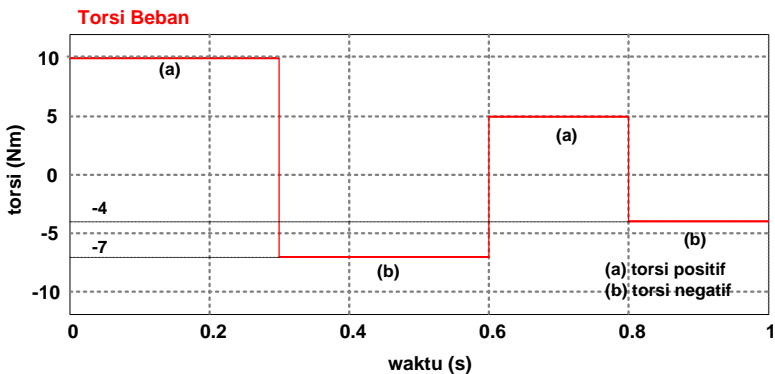
Bab ini membahas hasil simulasi konverter AC-DC-DC *isolated* untuk pengereman regeneratif motor induksi tiga fasa pada mobil listrik. Pada penelitian ini, keadaan regeneratif dari sistem diperoleh melalui dua cara, yaitu:

1. Pengujian sistem dengan kecepatan bervariasi
2. Pengujian sistem dengan torsi beban bervariasi

Gambar 4.1 merupakan kurva pengujian kecepatan bervariasi dan Gambar 4.2 merupakan kurva pengujian torsi beban bervariasi.



**Gambar 4.1** Kurva pengujian kecepatan bervariasi



**Gambar 4.2** Kurva pengujian torsi beban bervariasi

## 4.1 Pengujian Sistem dengan Kecepatan Bervariasi

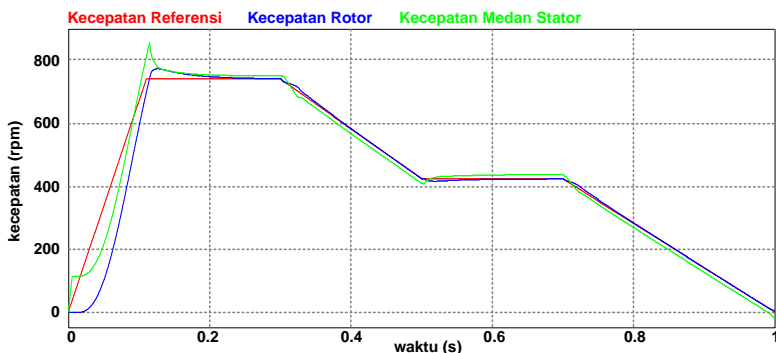
Pengujian ini bertujuan untuk mengamati pengaruh kecepatan yang berubah-ubah terhadap sistem, terutama ketika kecepatan menurun atau pengereman. Pada kondisi kecepatan menurun atau pengereman, sistem pada kondisi regeneratif. Berikut parameter-parameter pendukung untuk pengujian sistem dengan kecepatan bervariasi.

1. Kecepatan yang diujikan adalah 70 km/jam (743.1 rpm), 40 km/jam (424.6 rpm), 0 km/jam (0 rpm).
2. Torsi beban konstan 3 Nm dengan inersia 0.01 Nm.
3. Kondisi awal SOC baterai 93 %.
4. Durasi waktu pengujian 1 detik.

Data yang akan dianalisis yakni :

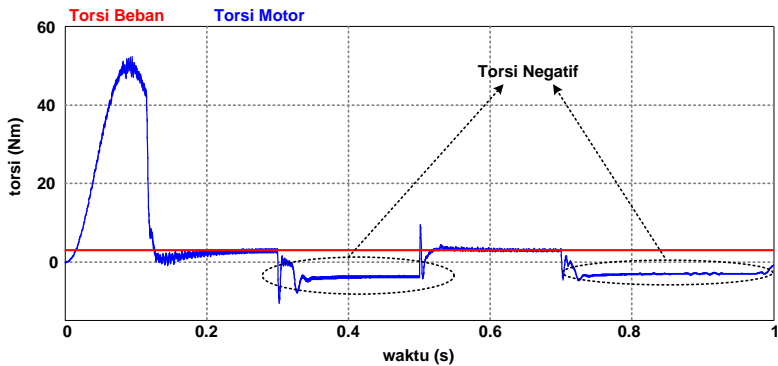
1. Perbandingan kecepatan referensi dengan kecepatan aktual motor.
2. Perbandingan torsi beban dengan respon torsi motor.
3. Perbandingan daya baterai, daya DC-bus dan daya motor.
4. Arus tiga fasa yang masuk ke motor.
5. SOC baterai.

Gambar 4.3 menunjukkan perbandingan antara kecepatan referensi, kecepatan rotor dan kecepatan medan stator. Dari gambar dapat dilihat bahwa kecepatan aktual motor atau kecepatan rotor berusaha mengikuti kecepatan referensi pada variasi kecepatan 743.1 rpm, 424.6 rpm, dan berhenti di 0 rpm. Kecepatan turun berarti motor mengalami pengereman dan pada kondisi tersebut terjadi pengereman regeneratif.



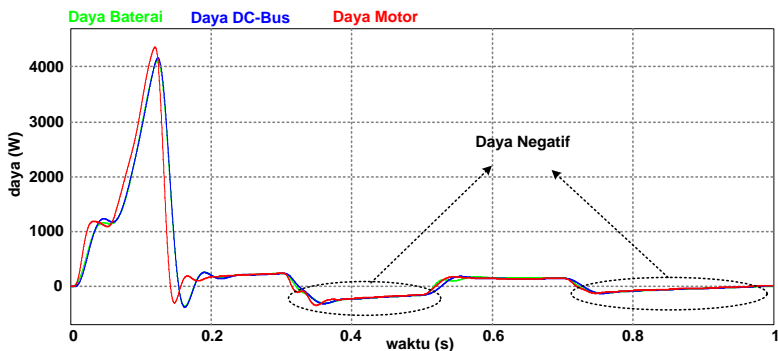
**Gambar 4.3** Kurva kecepatan referensi dan respon kecepatan motor

Kurva pada Gambar 4.4 menunjukkan perbandingan antara torsi beban dengan respon torsi motor. Pada Gambar ini ditunjukkan kondisi kerja atau respon torsi yang dihasilkan motor untuk memikul beban 3 Nm. Mengacu dari Gambar 4.3, pada kondisi regeneratif, ketika kecepatan menurun atau pengereman, respon torsi motor yang ditunjukkan Gambar 4.4 menjadi negatif. Hal ini dikarenakan adanya perubahan fungsi dari rotor yang semulanya diinduksi oleh stator beralih menjadi penginduksi stator.



**Gambar 4.4** Kurva torsi beban dan respon torsi motor

Kurva pada Gambar 4.5 menunjukkan kondisi daya dari sisem, yang meliputi daya baterai, daya DC-bus dan daya motor.

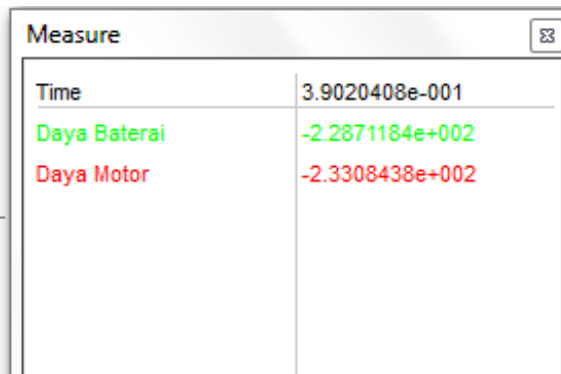


**Gambar 4.5** Kurva daya baterai, daya DC-bus dan daya motor

Dari Gambar 4.5, dapat diketahui pada kondisi awal (*start up*) terjadi lonjakan daya hal ini dikarenakan motor memikul torsi yang besar sehingga membutuhkan arus yang tinggi untuk segera mencapai kondisi stabil (*steady state*). Pada kondisi kecepatan konstan seketika daya yang dibutuhkan turun tidak seperti kondisi sebelumnya. Pada kondisi penurunan kecepatan atau pengereman aliran daya menjadi negatif, ini artinya daya bergerak dari motor menuju sumber baterai. Hal inilah yang dinamakan regeneratif.

Gambar 4.6 menunjukkan perbandingan antara daya negatif pada baterai dan daya negatif pada motor. Dari hasil simulasi diambil salah satu sampel waktu regeneratif pada detik ke 3.9 menunjukkan bahwa daya balik dari motor induksi tiga fasa mencapai 233.08 W sedangkan daya balik yang tersimpan ke baterai mencapai 228.71 W. Sehingga persentase daya yang masuk ke baterai adalah :

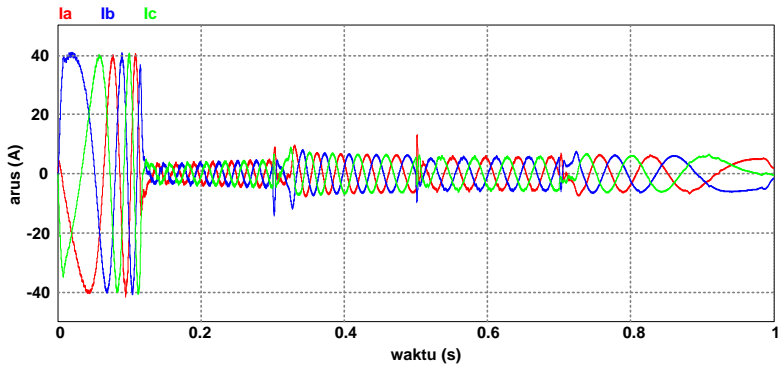
$$\% \text{ daya yang masuk ke baterai} = \frac{233.08 \text{ W}}{228.71 \text{ W}} \times 100\% = 98.12 \%$$



Time	3.9020408e-001
Daya Baterai	-2.2871184e+002
Daya Motor	-2.3308438e+002

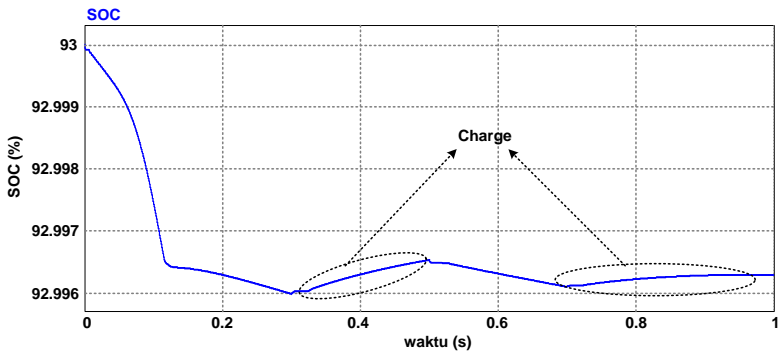
**Gambar 4.6** Perbandingan nilai daya negatif baterai dan motor

Untuk pengujian kecepatan bervariasi, arus tiga fasa yang masuk ke motor pada Gambar 4.7, memiliki frekuensi yang bervariasi pula. Hal ini dikarenakan kecepatan yang menjadi referensi berubah-ubah. Ketika kecepatan tinggi, maka frekuensi juga tinggi sehingga sinyal arus tiga fasa sangat rapat. Sebaliknya ketika kecepatan turun, frekuensi juga ikut turun dan sinyal arus tiga fasa yang terbentuk semakin renggang.



**Gambar 4.7** Arus tiga fasa yang masuk ke motor

Gambar 4.8 merupakan *State of Charge* pada baterai. Pada Gambar menunjukkan adanya kondisi *discharge* dan *charge*. Mengacu dari Gambar 4.3, pada kondisi kecepatan turun atau pengereman baterai mengalami pengisian daya (*charge*).



**Gambar 4.8** SOC baterai



## 4.2 Pengujian Sistem dengan Torsi Beban Bervariasi

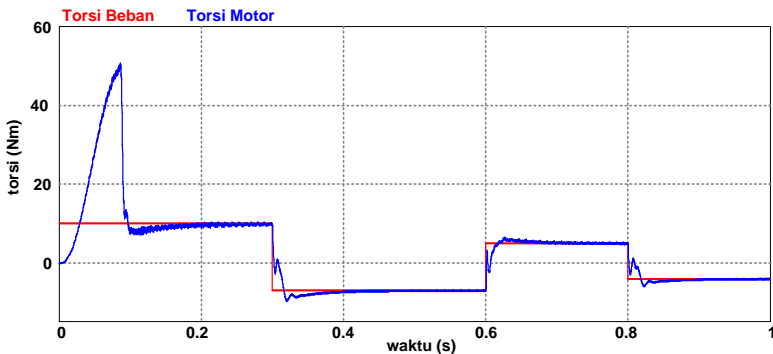
Pengujian ini bertujuan untuk mengamati pengaruh sistem terhadap perubahan medan lintasan yang dalam simulasi ini dianalogikan sebagai perubahan torsi. Untuk torsi positif mobil melaju di lintasan menanjak atau datar. Sedangkan torsi negatif mobil melaju di lintasan menurun. Dalam pengujian ini, hal utama yang perlu diperhatikan adalah saat sistem mendapatkan torsi beban negatif, karena saat itulah sistem dalam kondisi regeneratif. Berikut parameter-parameter pendukung untuk pengujian sistem dengan torsi beban bervariasi.

1. Perubahan torsi beban yang diujikan adalah 10 Nm, -7 Nm, 5 Nm, dan -4 Nm dengan inersia 0.01 Nm.
2. Kecepatan konstan 30 km/jam (318.5 rpm).
3. Kondisi awal SOC baterai 93 %.
4. Durasi waktu pengujian 1 detik.

Data yang akan dianalisis yakni :

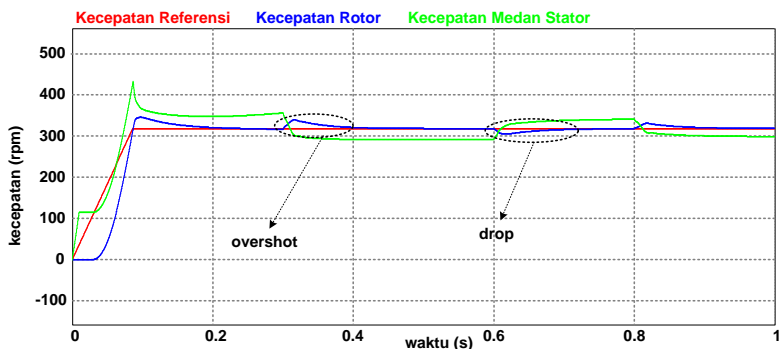
1. Perbandingan torsi beban dengan respon torsi motor.
2. Perbandingan kecepatan referensi dengan kecepatan aktual motor.
3. Perbandingan daya baterai, daya DC-bus dan daya motor.
4. Arus tiga fasa yang masuk ke motor.
5. SOC baterai.

Kurva pada Gambar 4.9 menunjukkan perbandingan antara torsi beban dengan respon torsi motor. Pada Gambar ini, respon torsi yang dihasilkan motor mampu memikul torsi beban yang telah ditetapkan. Torsi negatif menunjukkan motor berada dalam lintasan yang menurun, dan pada kondisi inilah motor dalam kondisi regeneratif.



**Gambar 4.9** Kurva respon torsi yang dihasilkan motor dan torsi beban

Gambar 4.10 menunjukkan kecepatan referensi, kecepatan rotor, dan kecepatan medan stator pada motor induksi tiga fasa. Kecepatan aktual motor atau kecepatan rotor berusaha untuk stabil mengikuti kecepatan referensi 318.5 rpm. Dalam kondisi riil, ketika mobil berada dilintasan menurun (torsi negatif), mobil mendapat gaya dorong sehingga perlu adanya pengereman untuk membatasi gaya dorong tersebut agar tidak berlebihan. Sebaliknya pada lintasan yang menanjak (torsi positif) mobil perlu gaya dorong tambahan agar dapat melaju dikecepatan tertentu. Sehingga pada kurva respon kecepatan rotor mengalami lonjakan sesaat (*overshot*) ketika mendapat torsi negatif. Sebaliknya, kurva kecepatan rotor mengalami penurunan sesaat (*drop*) ketika mendapat torsi positif. Pada kecepatan medan stator, saat torsi positif kecepatan lebih tinggi agar induksi ke rotor lebih besar. Sebaliknya saat mendapat torsi negatif kecepatan medan stator menurun hal ini bertujuan agar induksi ke rotor dapat dilemahkan.

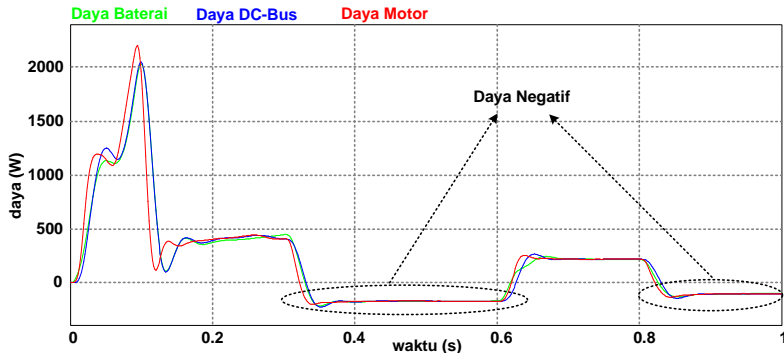


**Gambar 4.10** Kurva kecepatan referensi dan respon kecepatan motor

Kurva pada Gambar 4.11 menunjukkan kondisi daya dari sisem pada pengujian torsi beban bervariasi, yang meliputi daya baterai, daya DC-bus dan daya motor.

Sama dengan kondisi daya pada pengujian kecepatan bervariasi. pada kondisi awal (*start up*) terjadi lonjakan daya hal ini dikarenakan motor memikul torsi yang besar sehingga membutuhkan arus yang tinggi untuk segera mencapai kondisi stabil (*steady state*). Setelah mencapai kondisi *steady state* seketika daya yang dibutuhkan turun tidak seperti kondisi sebelumnya. Pada kondisi lintasan menanjak atau torsi positif, aliran daya bergerak dari baterai menuju motor. Sebaliknya pada

lintasan menurun atau torsi negatif aliran daya menjadi negatif, ini artinya daya bergerak dari motor menuju sumber baterai. Hal inilah yang dinamakan regeneratif.



**Gambar 4.11** Kurva daya baterai, daya DC-bus dan daya motor

Gambar 4.12 menunjukkan perbandingan antara daya negatif pada baterai dan daya negatif pada motor. Dari hasil simulasi diambil salah satu sampel waktu regeneratif menunjukkan pada detik ke 6, daya balik dari motor induksi tiga fasa mencapai 172.02 W sedangkan daya balik yang tersimpan ke baterai adalah 170.31 W. Sehingga persentase daya yang masuk ke baterai adalah :

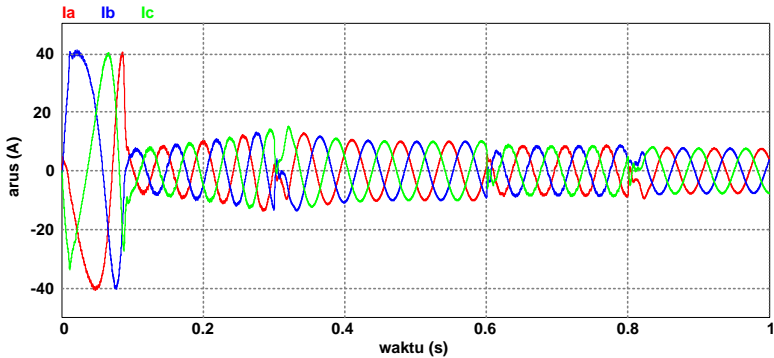
$$\% \text{ daya yang masuk ke baterai} = \frac{170.31 \text{ W}}{172.02 \text{ W}} \times 100\% = 99.00 \%$$

Measure	
Time	6.0000000e-001
Daya Baterai	-1.7031247e+002
Daya Motor	-1.7202194e+002

**Gambar 4.12** Perbandingan nilai daya negatif baterai dan motor

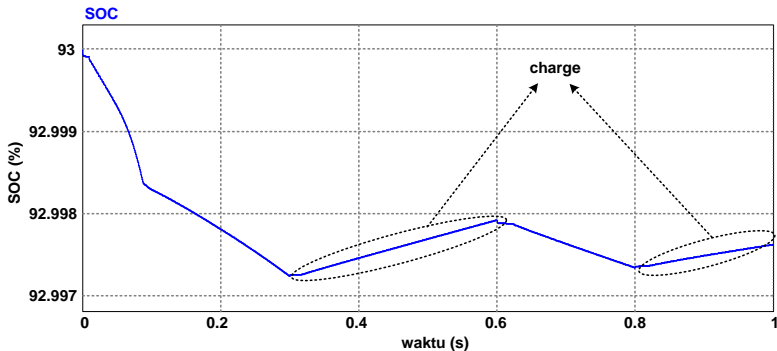
Untuk pengujian torsi beban bervariasi, arus tiga fasa yang masuk ke motor pada Gambar 4.13 memiliki frekuensi yang hampir sama. Hal ini dikarenakan motor beroperasi pada kecepatan referensi yang konstan. Pada pengujian ini, amplitudo arus berbeda untuk kondisi torsi yang

berbeda pula. Ketika torsi positif dan torsi negatifnya semakin besar maka amplitudo arus yang masuk ke motor juga semakin besar.



**Gambar 4.13** Arus tiga fasa yang masuk ke motor

Gambar 4.14 merupakan *State of Charge* pada baterai untuk pengujian torsi beban bervariasi. Pada Gambar menunjukkan adanya kondisi *discharge* dan *charge*. Mengacu dari Gambar 4.9, pada kondisi lintasan menaik atau torsi positif baterai mengalami pelepasan daya (*discharge*). Sebaliknya pada lintasan menurun atau torsi negatif baterai mengalami pengisian daya (*charge*).



**Gambar 4.14** SOC baterai

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## **BAB V**

### **PENUTUP**

#### **5.1 Kesimpulan**

Dari hasil simulasi dan analisis data yang dilakukan dapat ditarik kesimpulan bahwa:

- 1) Konverter AC-DC-DC *isolated* dapat bekerja dua arah (*bidirectional*) yakni mampu beroperasi pada kondisi motor akselerasi dan motor regeneratif.
- 2) Melalui uji kecepatan bervariasi, kecepatan aktual motor mampu mengikuti kecepatan referensi yakni 743.1 rpm, 424.6 rpm, dan 0 rpm. Saat kecepatan turun atau regeneratif, torsi motor menjadi negatif dan motor induksi berperan sebagai generator induksi yang menghasilkan daya balik (daya negatif). Persentase daya yang tersimpan ke baterai mencapai 98.12%.
- 3) Melalui uji torsi bervariasi, torsi motor dapat menyesuaikan torsi referensi yakni 10 Nm, -7 Nm, 5 Nm, dan -4 Nm. Selain itu, motor berusaha untuk mempertahankan kecepatan konstan. Ketika mendapat torsi positif kecepatan motor mengalami penurunan sesaat (*drop*). Saat mendapat torsi negatif atau regeneratif kecepatan motor sedikit mengalami lonjakan (*overshot*) dan motor induksi berperan menjadi generator induksi yang menghasilkan daya balik (daya negatif). Persentase daya yang tersimpan ke baterai mencapai 99 %.
- 4) Pada keadaan motor regeneratif, baterai dapat melakukan pengisian (*charging*). Hal ini terbukti melalui kurva *State of Charge* (SOC) yang mengalami kenaikan.

#### **5.2 Saran**

Saran yang diberikan pada penelitian ini adalah :

- 1) Pada penelitian ini untuk *drive-train* dan konstruksi mobil masih belum diperhitungkan diharapkan untuk penelitian berikutnya analisis dari *drive-train* dan konstruksi mobil dapat diterapkan.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] William W. Bottorff, “*What was the First Car : A Quick History of the Automobile for Young People*”, <http://www.ausbcomp.com/~bbott/cars/carhist.htm>.
- [2] Mounir Zeraoulia, Mohamed El Hachemi Benbouzid, and Demba Diallo, “*Electric Motor Drive Selection Issues for HEV Propulsion System: A Comparative Study*” IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.44, No.1, 1997.
- [3] Hiroshi Shimizu, Junji Harada, Colby Bland, Kiyomoto Kawakami Lam Chan, “*Advanced Concept in Electric Vehicle Design*”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.44, No.1, 1997.
- [4] Li Lihua., Smedley K., Jin Taotao, “*Three-Phase Rectifier for Regenerative Braking Application*”, July, 2007.
- [5] Zhao J.F., Jiang J.G., Yang X.W.: ‘*AC-DC-DC isolated converter with bidirectional power flow capability*’, IET Power Electronics., 2009.
- [6] C.C. Chan., K.T. Chau., *An Overview of Power Electronics in Electric Vehicles*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 44 No. 1, 1997.
- [7] Happyanto Dedit Cahya., *Pengendalian Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa Berbasis IFOC menggunakan PID Fuzzy Swatara pada Mobil Elektrik*, Prosiding Sidang Terbuka Promosi Doktor, 2012.
- [8] Lithium Ion Battery, <http://physicsandsocietybc.wordpress.com/2013/04/03/the-rocking-chair-battery-lithium-ion-battery/>
- [9] Jain M., Daniele M., Jain P.K., “*A Bidirectional DC–DC Converter Topology for Low Power Application*”, IEEE Transactions Power Electronics, Vol.15, No. 4, pp. 595–606, 2000.
- [10] Hui S.Y., Chung H., Yip S.C., “*A Bidirectional AC–DC Power Converter With Power Factor Correction*”, IEEE Transactions Power Electronics, Vol.15, No. 5, pp. 942–948, 2000.



*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## RIWAYAT HIDUP



**Muhammad Rizky Akbar** lahir 17 Februari 1993 di kota Binjai, Sumatera Utara. Riwayat pendidikan formal penulis adalah lulusan SDN 006 Tualang Siak Sri Indrapura, SMPN 2 Nganjuk, dan SMAN 1 Sukomoro Nganjuk. Kemudian melanjutkan pendidikan tinggi di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya jurusan Teknik Elektro. Penulis mengambil bidang studi Teknik Sistem Tenaga. Semasa kuliah, penulis aktif sebagai asisten Laboratorium Konversi Energi Listrik. Penulis yang gemar olahraga bridge ini turut serta menyalurkan hobinya di Unit Kegiatan Mahasiswa (UKM) Bridge ITS.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*